



Sistemi tecnologici innovativi di involucro per il recupero del patrimonio edilizio recente: l'edilizia scolastica nel comune di Bologna

Cecilia Mazzoli

► To cite this version:

Cecilia Mazzoli. Sistemi tecnologici innovativi di involucro per il recupero del patrimonio edilizio recente: l'edilizia scolastica nel comune di Bologna. Architecture, space management. Université Paris-Est, 2015. Italian. NNT: 2015PESC1082 . tel-01244350

HAL Id: tel-01244350

<https://theses.hal.science/tel-01244350>

Submitted on 15 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
Dottorato di Ricerca in Architettura
Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile ed Architettura
XXVII Ciclo di Dottorato



Tesi svolta in cotutela con:
École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais (ENSAPM)
Université Paris-Est - École Doctorale n°528
Mention "Ville, Transports et Territoires" (EDVTT)

***Sistemi tecnologici innovativi di involucro per il recupero del patrimonio edilizio recente.
L'edilizia scolastica nel Comune di Bologna***

*Systèmes technologiques de façade innovants pour la rénovation du patrimoine bâti
contemporain. Les bâtiments scolaires à Bologne*

Presentata da: Cecilia Mazzoli

Coordinatore Dottorato: Prof.ssa Annalisa Trentin

Tutor sede italiana: Prof. Riccardo Gulli

Tutor sede francese: Prof. Maurizio Brocato

Settore Concorsuale di afferenza: 08/C1 – Design e Progettazione Tecnologica dell'Architettura

Settore Scientifico Disciplinare: ICAR/10 Architettura Tecnica

Esame finale: giugno 2015

INDICE

SINTESI / RÉSUMÉ

Sintesi estesa della tesi	I
Résumé étendu de la thèse	XI

INTRODUZIONE / INTRODUCTION

I	Ambito scientifico-disciplinare	1
II	Campo di indagine	3
III	Istanze e obiettivi di ricerca	8
IV	Attività di ricerca	10
V	Risultati	13

PARTE I - MATERIALI E TECNICHE / PARTIE I - MATÉRIAUX ET TECHNIQUES

I. STATO DELL'ARTE / ÉTAT DE L'ART

I.1	Riqualficazione del patrimonio edilizio pubblico recente	21
	I.1.1 Aspetti normativi	24
	I.1.2 Stato attuale	30
	I.1.3 Criteri di intervento	34
I.2	Recupero dei sistemi costruttivi di involucro	37
	I.2.1 L'involucro architettonico come sistema "attivo"	41
	I.2.2 Soluzioni tecnologiche per il recupero dell'involucro	49
	I.2.3 Materiali innovativi per un efficientamento energetico ecosostenibile	72

II. PROCESSI E METODI PER LA RIQUALIFICAZIONE DELL'INVOLUCRO / PROCESSUS ET MÉTHODES POUR

LA RÉNOVATION DE L'ENVELOPPE

	Introduzione	89
II.1	Rilievo geometrico preliminare agli interventi sul costruito	93
II.2	Progettazione di interventi "su misura"	101

II.3	Sperimentazione costruttiva e prototipazione	111
II.4	Verifica prestazionale e requisiti di qualità costruttiva	113

III. SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA / EXPÉRIMENTATION CONSTRUCTIVE

Introduzione	117	
III.1	I Sistema innovativo di involucro costituito da cubi autobloccanti <i>TIM - Topologically Interlocked Materials</i> (Laboratoire GSA – ENSAPM École Nationale Supérieure d’Architecture Paris-Malaquais)	135
III.1.1	Progettazione parametrica del sistema costruttivo	137
III.1.2	Analisi meccanica e termica	153
III.1.3	Sperimentazione costruttiva e prototipazione	199
	III.1.3.1 Sperimentazione presso S.N.B.R. (Troyes)	201
	III.1.3.2 - Sperimentazione presso <i>Les Grands Ateliers de L’Isle d’Abeau</i> (Villefontaine, Lione)	203
III.1.4	Verifica delle tecniche di messa in opera e dei requisiti prestazionali	213
III.2	II Sistema innovativo di involucro a trama esagonale <i>G-SKinnED - Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design</i> (CIRI Edilizia e Costruzioni – ALMA MATER STUDIORUM Università di Bologna)	217
III.2.1	Progettazione parametrica del sistema costruttivo	223
III.2.2	Analisi meccanica e termica	247
III.2.3	Sperimentazione costruttiva e prototipazione	275
III.2.4	Verifica delle tecniche di messa in opera e dei requisiti prestazionali	285

PARTE II - ANALISI E PROGETTO / PARTIE II - ANALYSE ET PROJET

IV. UN CASO DI STUDIO. IL PATRIMONIO EDILIZIO SCOLASTICO DI BOLOGNA / UN ÉTUDE DE CAS. LE PATRIMOINE BÂTI SCOLAIRE DE BOLOGNE

IV.1	Edilizia scolastica	293
IV.1.1	Inquadramento normativo della tematica	293
IV.1.2	Politica di intervento del Comune di Bologna	298
IV.1.3	Classificazione delle scuole secondarie di primo grado bolognesi	308

IV.1.4	Esperienze progettuali significative	322
IV.2	Edilizia prefabbricata (1960-80)	331
IV.2.1	Processo di industrializzazione in ambito edilizio	331
IV.2.2	Evoluzione dei caratteri tipologici e costruttivi	342
IV.2.3	Prefabbricazione con elementi lineari per l'edilizia scolastica	357
IV.3	Valutazione dello stato conservativo prestazionale	363
IV.3.1	Vulnerabilità strutturale	368
IV.3.2	Prestazioni energetiche	378
IV.4	Criteri progettuali di intervento	417

V. IL PROGETTO DI INTERVENTO PER LA SCUOLA MEDIA “DOZZA” / LE PROJET D’INTERVENTION POUR L’ÉCOLE SECONDAIRE “DOZZA”

	Introduzione	425
V.1	Descrizione dell'intervento / Description de l'intervention	429
V.2	Tavole di progetto / Planches de projet	447

CONCLUSIONI / CONCLUSIONS

I	Esiti finali	451
II	Sviluppi futuri della ricerca	457

APPENDICE - SCHEDE ANAGRAFICHE E DI RILIEVO / ANNEXE - FICHES ANAGRAPHIQUES ET DE RELEVÉ

	Scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) nel Comune di Bologna	463
--	--	-----

	ARCHIVI	569
--	----------------	-----

	BIBLIOGRAFIA RAGIONATA	571
--	-------------------------------	-----

	RIFERIMENTI NORMATIVI (NAZIONALI ED EUROPEI)	583
--	---	-----

	RIFERIMENTI FIGURE	589
--	---------------------------	-----

Sintesi
Résumé

SINTESI ESTESA DELLA TESI

INTRODUZIONE

La ricerca è volta a presentare un nuovo approccio integrato, a supporto di operatori e progettisti, per la gestione dell'intero processo progettuale di interventi di riqualificazione energetica e architettonica del patrimonio edilizio recente, mediante l'impiego di soluzioni tecnologiche innovative di involucro edilizio.

Lo studio richiede necessariamente l'acquisizione di un repertorio selezionato di sistemi costruttivi di involucro, come base di partenza per l'elaborazione di soluzioni progettuali di recupero delle scuole appartenenti al secondo dopoguerra, in conglomerato cementizio armato, prevalentemente prefabbricate.

Il progetto individua procedimenti costruttivi ecocompatibili per la progettazione di componenti prefabbricati di involucro "attivo", adattabile ed efficiente, da assemblare a secco, nel rispetto dei requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative. La ricerca è finalizzata alla gestione dell'intero processo, supportato da sistemi di rilevazione geometrica, collegati a software di programmazione parametrica per la modellazione di superfici adattabili alla morfologia dei fabbricati oggetto di intervento. Tali strumenti informatizzati CAD-CAM sono connessi a macchine a controllo numerico CNC per la produzione industrializzata degli elementi costruttivi "su misura".

A titolo esemplificativo dell'approccio innovativo proposto, si formulano due possibili soluzioni di involucro in linea con i paradigmi della ricerca, nel rispetto dei principi di sostenibilità, intesa come modularità, rapidità di posa, reversibilità, recupero e riciclo di materiali. In particolare, le soluzioni innovative sono accomunate dall'applicazione di una tecnica basata sull'assemblaggio di elementi prefabbricati, dall'adozione di una trama esagonale per la tassellazione della nuova superficie di facciata, e dall'utilizzo del medesimo materiale termico isolante, plastico e inorganico, riciclato ed ecosostenibile, a basso impatto ambientale (*AAM - Alkali Activated Materials*).

PARTE I - MATERIALI E TECNICHE

I. STATO DELL'ARTE

Il primo capitolo affronta la trattazione delle tematiche generali necessarie per delineare in maniera completa il contesto di ricerca in cui si inserisce il progetto, in relazione allo stato dell'arte dei sistemi costruttivi di involucro e dei materiali isolanti tradizionalmente impiegati nel settore

costruttivo.

La prima parte è dedicata alla *Riqualificazione del patrimonio edilizio pubblico recente*, comprendente le scuole pubbliche, affrontata in relazione agli aspetti normativi, allo stato conservativo e prestazionale attuale, e ai criteri di intervento adottabili ai fini di un suo recupero. La delineazione dei criteri di intervento è volta a fornire un insieme di paradigmi e istanze di ricerca, promossi dal progetto di ricerca come principi guida per la conduzione di interventi di efficientamento energetico ecosostenibile del costruito.

La seconda parte, riguardante il *Recupero dei sistemi costruttivi di involucro*, si rivolge alle tecniche costruttive esistenti di efficientamento energetico basate sull'impiego di materiali e dispositivi in grado di conferire un comportamento "attivo" alla facciata degli edifici. Con il termine "attivo" si intende un sistema in grado di garantire un comportamento regolabile ed adattabile, capace di interagire con il contesto climatico esterno, dunque energeticamente efficiente.

In particolare, per questa categoria di facciate, viene fornita una classificazione delle soluzioni tecnologiche di recupero dell'involucro attualmente presenti nel settore delle costruzioni, delineata secondo un quadro descrittivo che comprende sia i diversi sistemi costruttivi (involucro trasparente, involucro opaco, sistema ventilato, sistema "a cappotto", sistema *vêtture*, *shading screen*, involucro massivo), che i vari materiali impiegati per la riqualificazione energetica.

Tale descrizione viene presentata nell'ottica di valutarne tanto le prestazioni energetiche e meccaniche, quanto le proprietà legate all'impatto ambientale e alla sostenibilità, intesa come quantità di energia immagazzinata dai prodotti. Considerando l'energia grigia inglobata da ogni materiale, si valuta dunque la produzione di energia che caratterizza l'intero processo che comprende la fase iniziale di estrazione della materia prima, seguita dalla fase di produzione e configurazione, dal trasporto in cantiere, dall'installazione e posa in opera, fino ad arrivare alla vita utile e all'eventuale processo finale di dismissione.

A partire dall'analisi dello stato dell'arte di sistemi costruttivi di involucro edilizio, si procede all'elaborazione di nuove soluzioni tecnologiche per il recupero energetico delle facciate, dal carattere innovativo in termini di composizione costruttiva e di materiale ecosostenibile impiegato.

II. PROCESSI E METODI PER LA RIQUALIFICAZIONE DELL'INVOLUCRO

Il secondo capitolo riguarda l'illustrazione dei processi e metodi per la riqualificazione dell'involucro considerati alla base dell'approccio innovativo proposto per la conduzione degli interventi di recupero del costruito, che accompagni progettisti e operatori durante l'intero processo, a partire dall'analisi fino al progetto e alla sua realizzazione finale.

Secondo lo schema grafico riepilogativo espresso all'inizio del capitolo, la prima fase del processo riguarda l'analisi dello stato di fatto del patrimonio edilizio scolastico recente (1960-80),

comprendente il *Rilievo geometrico e descrittivo* e la valutazione dello stato conservativo, al fine di redigere schede anagrafiche e di rilievo, valide come punto di partenza per la progettazione degli interventi.

Successivamente alla fase di analisi preliminare, ha inizio la fase di *Progettazione di interventi “su misura”* per il recupero dell’involucro edilizio dei fabbricati, svolta secondo un approccio parametrico alla progettazione della morfologia del secondo involucro da giustapporre alle facciate esistenti degli edifici in oggetto.

Una volta elaborata la geometria del nuovo involucro edilizio, definita grazie all’utilizzo di software parametrico-variazionali a elevata precisione, è possibile esportare le coordinate geometriche, al fine di realizzare un modello virtuale su cui svolgere analisi meccaniche e termiche. I risultati ottenuti da queste analisi numeriche vengono in seguito confrontati con i risultati ottenuti dalle misurazioni e dai test svolti sui modelli reali, realizzati in seguito alle fasi di *Sperimentazione costruttiva e prototipazione*.

Tale fase costituisce la parte essenziale del processo, in quanto momento di *Verifica prestazionale e dei requisiti di qualità costruttiva*.

La formulazione di due soluzioni progettuali di involucro risulta fondamentale per illustrare l’applicazione del processo progettuale, continuo e integrato, proposto per la riqualificazione delle facciate esistenti, supportato dall’impiego di macchine a controllo numerico CNC per la fabbricazione digitale degli elementi progettati che, attraverso l’uso di interfaccia CAD-CAM, consentono il passaggio dal modello virtuale a quello reale.

L’esito finale del progetto di ricerca non riguarda quindi l’elaborazione di due specifiche soluzioni progettuali di involucro, che risulterebbe alquanto riduttiva, oltre che non totalmente esaustiva (in quanto le tecniche proposte necessiterebbero ulteriori verifiche e sperimentazioni), bensì la presentazione di un nuovo approccio integrato, a supporto di operatori e progettisti, per la gestione dell’intero processo progettuale degli interventi di recupero.

III. SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA

La seconda fase dello studio affronta il tema del progetto di interventi “su misura” per la riqualificazione prestazionale dell’involucro, con specifico riferimento alla tipologia degli edifici scolastici.

La soluzione oggi più diffusa per l’efficientamento energetico e la figurazione architettonica dei prospetti consiste nell’impiego di una facciata ventilata, costituita da una struttura a telaio di supporto per la posa di pannelli leggeri di tamponamento. La ricerca qui sviluppata intende invece formulare una proposta alternativa, ovvero un componente di facciata fissato meccanicamente alle pareti d’ambito e costituito dall’assemblaggio di elementi modulari, al fine di ottenere una sempli-

ficazione delle procedure di messa in opera e una ottimizzazione delle prestazioni.

Tale obiettivo viene perseguito mediante l'impiego di una soluzione costruttiva ottenuta dall'assemblaggio a secco di elementi modulari prefabbricati a costituire uno strato coibente/massivo caratterizzato da un materiale innovativo che garantisce il soddisfacimento dei seguenti requisiti: plasticità, inorganicità, buon equilibrio tra le proprietà termiche e meccaniche, elevata ecosostenibilità e basso impatto ambientale. In particolare, ci si riferisce a un materiale termico isolante geopolimerico (*AAM - Alkali Activated Materials*) caratterizzato dai seguenti valori: densità $d = 200 \text{ kg/m}^3$, coefficiente di conducibilità termica $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, calore specifico $c_s = 1.080 \text{ J/kgK}$, coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo $\mu = 5$, e resistenza meccanica a compressione $R_c = 3,5 \text{ MPa}$.

La formulazione di due sistemi tecnologici integrati per il miglioramento delle prestazioni energetiche delle pareti di involucro risulta fondamentale per illustrare, a titolo dimostrativo, l'applicazione del processo progettuale proposto per il recupero dell'esistente, secondo un approccio innovativo, costituito da una approfondita fase teorica, indissolubilmente legata alla fase pratica finale.

I due studi sui sistemi di involucro edilizio presentati all'interno della Tesi, seppure connotati da una diversa concezione costruttiva, mantengono corrispondenze comuni sia per quanto attiene il rispetto dei presupposti sopracitati, sia nel seguire un indirizzo di ricerca che coniuga la fase di indagine teorica alla sperimentazione eseguita in laboratorio.

Il I Sistema innovativo di involucro, costituito da cubi autobloccanti *TIM - Topologically Interlocked Materials*, è studiato sotto la guida del Laboratoire GSA - Géométrie Structure Architecture de l'ENSAPM - École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais, dedito allo sviluppo di tematiche di ricerca scientifica secondo un approccio geometrico e strutturale supportato da software di analisi meccanica, imprescindibilmente seguito da una validazione del modello attraverso la realizzazione di prototipi, verifica ultima essenziale per la validità del progetto. Il sistema costruttivo a secco è basato sull'assemblaggio di conci identici di forma cubica, a costituire una struttura bidimensionale in cui essi sono topologicamente autobloccati, dunque mantenuti stabili nella loro posizione, grazie agli sforzi reciprocamente scambiati in virtù delle loro proprietà geometriche. Questo sistema di assemblaggio presenta grandi potenziali per lo sviluppo di soluzioni costruttive innovative dotate di una elevata resistenza meccanica, aprendo nuove possibili strade nel campo del design di strutture e materiali. L'aspetto innovativo non consiste soltanto nell'applicazione del principio di autobloccaggio, tipicamente utilizzato per i componenti edilizi bidimensionali orizzontali (quali solai, pavimentazioni, coperture) a componenti verticali di facciata, bensì anche nell'impiego del nuovo materiale geopolimerico ecosostenibile (*AAM - Alkali Activated Material*). Lo studio e l'approfondimento dei sistemi costruttivi di facciata si completa inserendosi all'interno di un più vasto progetto di collaborazione con Les Grands Ateliers de l'Isle

d'Abeau (Villefontaine, Lione), presso i quali è possibile la realizzazione dei modelli costruttivi studiati e la loro verifica strutturale, mediante lo svolgimento di misurazioni e prove di carico.

Il II Sistema innovativo di involucro a trama esagonale *G-SKinnED* (*Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design*) è studiato in collaborazione con il CIRI - Edilizia e Costruzioni dell'Università di Bologna, presso il quale è stata possibile la sperimentazione diretta del materiale innovativo geopolimerico per l'isolamento termico. In particolare, il sistema proposto è costituito da pannelli prefabbricati, composti da una struttura a trama esagonale, in materiale riciclato leggero e resistente, realizzato con stampanti 3D per la riproduzione di modelli digitali CAD. Ogni pannello a trama esagonale estrusa presenta il duplice ruolo di conferire rigidità per forma e di servire come cassaforma a perdere per contenere il getto di materiale isolante plastico. La particolare geometria esagonale del pannello offre la possibilità di ottenere un peculiare sistema di incastro tra i pannelli e, dunque, una riduzione dei sistemi di connessione tra i componenti e tra i pannelli stessi e la facciata esistente, con conseguenze benefiche anche in termini di riduzione dei ponti termici e di discontinuità. Inoltre, la sostenibilità del sistema di facciata consiste nell'impiego del materiale isolante innovativo geopolimerico AAM, plastico, inorganico ed ecosostenibile, ottenuto dal riciclo di polveri derivate da scarti di produzione del laterizio, attivate alcalinamente a temperatura ambiente, dunque con ridotto impatto ambientale.

PARTE II - ANALISI E PROGETTO / PARTIE II - ANALYSE ET PROJET

IV. UN CASO DI STUDIO. IL PATRIMONIO EDILIZIO SCOLASTICO DI BOLOGNA

Con riferimento al processo progettuale proposto, questo capitolo ne illustra la prima fase, dedicata alla ricognizione del patrimonio edilizio esistente oggetto di intervento, con particolare sguardo verso il sistema edilizio di involucro. Al fine di costituire un completo quadro descrittivo e un valido punto di partenza per la progettazione degli interventi, viene fornita preliminarmente l'analisi dello stato di fatto, comprendente il rilievo geometrico e descrittivo, seguita dalla valutazione dello stato conservativo, svolta seguendo un protocollo speditivo.

La prima parte tratta dell'*Edilizia scolastica*, in particolare delle scuole realizzate a Bologna che sono state individuate dalla ricerca come oggetto di intervento di particolare interesse all'interno del patrimonio edilizio esistente. Secondo i dati rilevati durante l'ultimo Rapporto annuale di Legambiente Ecosistema Scuola, i due terzi dell'edilizia scolastica esistente sono costituiti da edifici costruiti tra il 1940 e il 1990 che, nel tempo, non hanno subito sostanziali trasformazioni e adeguamenti. Si tratta dunque di organismi edilizi che attualmente presentano molteplici problematiche, legate alla sicurezza statica e alla vulnerabilità sismica (emersa in maniera eclatante proprio durante l'anno 2012 in Emilia), al consumo di risorse energetiche, al comfort ambientale

interno, alle condizioni di fruizione e sicurezza, alle qualità estetiche e architettoniche, e alla loro gestione da parte degli Enti preposti. La ricerca è finalizzata a condurre una preliminare indagine a carattere sistemico, in grado di fornirne una classificazione fondata su molteplici chiavi di lettura: cronologico-temporale, figurativa, tipologico-dimensionale, costruttiva, prestazionale. In ambito di recupero di un oggetto edilizio esistente, infatti, una delle operazioni primarie da effettuare consiste nella valutazione speditiva dello stato conservativo e prestazionale (energetica e strutturale) dell'edificio, come base di partenza per una appropriata progettazione del recupero stesso. Tale base informativa, rivolta principalmente all'involucro edilizio degli edifici analizzati, rappresenta dunque una sorta di dizionario tecnico di ausilio nella formulazione delle soluzioni innovative proposte al termine della Tesi (*Appendice - Schede anagrafiche e di rilievo*).

La seconda parte del capitolo affronta l'*Edilizia prefabbricata (1960-80)*, trattando la tematica legata alla tecnologia costruttiva prevalentemente adottata per gli edifici destinati ad accogliere le scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie), particolare oggetto di studio e intervento. La maggior parte di esse, infatti, è stata realizzata durante il periodo tra 1960 e il 1980, e presenta prevalentemente una struttura in conglomerato cementizio armato, totalmente o parzialmente prefabbricata, con tamponamenti in pannelli prefabbricati di conglomerato cementizio armato e altri materiali. Si tratta di strutture costituite da un involucro dall'aspetto attuale molto decadente, con importanti segni di degrado a livello sia strutturale-costruttivo, sia estetico-architettonico. Per le metodologie di acquisizione dei dati, si è ricorso alle varie modalità di ricerca per il riconoscimento di quegli elementi che vengono considerati rilevanti: ricerche archivistiche; indagini bibliografiche e consultazione di libri, riviste, cataloghi, annuari e quaderni del Comune di Bologna; sopralluoghi speditivi e indagini dirette.

La terza parte del capitolo riguarda la *Valutazione dello stato conservativo prestazionale* del patrimonio edilizio scolastico bolognese analizzato, preliminare alla sintesi presentata sotto forma di schede tecniche di rilievo e valutazione speditiva di requisiti e prestazioni. La metodologia di indagine del patrimonio edilizio si fonda sulla necessità di formare un organico rapporto sulla consistenza quantitativa e qualitativa del singolo edificio comprendente una analisi esauriente dei degradi visibili, con particolare riguardo per l'involucro edilizio, considerato componente edile fondamentale per il comportamento prestazionale. Tale rapporto si traduce nella realizzazione di rilievi della conformazione geometrica degli oggetti edilizi entro il loro contesto microurbanistico, svolti mediante l'utilizzo degli strumenti attuali di rilievo metrico (fotogrammetria e laser scanner), affiancati dalla raccolta di materiale fotografico acquisito durante i sopralluoghi. Questo materiale fornisce una valida classificazione dei trenta edifici scolastici in esame, finalizzata all'individuazione di azioni e strategie di intervento per la riqualificazione mediante soluzioni di involucro. Al fine di redigere queste schede, è necessario che il rilievo in situ di ogni fabbricato sia affiancato dalla consultazione di documenti progettuali originali per accertare lo stato conoscitivo relativo a

parti inaccessibili, ovviamente dopo aver verificato l'eventuale svolgimento di successivi lavori modificativi. Risulta pertanto fondamentale la redazione di un protocollo da seguire per svolgere un'approfondita analisi di carattere sistemico, grazie al quale è possibile compilare schede contenenti la descrizione e la valutazione dello stato conservativo di: strutture portanti, chiusure verticali, chiusure superiori e inferiori, partizioni interne verticali e orizzontali, impianti tecnici e tutti gli altri elementi costituenti l'organismo edilizio, fino ai suoi dettagli costruttivi.

Come esposto nella quarta parte del capitolo riguardante i *Criteri progettuali di intervento*, l'acquisizione di un selezionato repertorio di finite soluzioni tipologico-costruttive del patrimonio edilizio scolastico recente consente di individuare le problematiche più rilevanti riferite agli elementi costituenti l'involucro, permettendo così di delineare i criteri progettuali di intervento nelle pratiche di recupero. Uno studio attento e consapevole delle strategie di intervento sul patrimonio edilizio esistente non può infatti prescindere da una approfondita analisi del contesto esistente, e dunque dalla stesura di un quadro sinottico delle tipologie strutturali e costruttive, in grado di restituire un quadro descrittivo il più possibile completo e preciso.

V. IL PROGETTO DI INTERVENTO PER LA SCUOLA MEDIA “DOZZA”

Il presente progetto di ricerca è volto all'illustrazione di un nuovo processo progettuale per gli interventi di riqualificazione del costruito mediante addizione volumetrica in facciata che, a partire dal rilievo metrico dell'edificio oggetto di intervento, conduca all'esito finale corrispondente alla formulazione di una soluzione costruttiva modulare, adattabile e applicabile a diversi casi di recupero dell'involucro edilizio.

Dopo una attenta analisi critica delle due soluzioni innovative proposte, che rappresentano l'esito finale di un percorso continuo e integrato, all'interno di questo capitolo finale si elabora un progetto di riqualificazione basato sul II Sistema di involucro, denominato *G-SKinnED*, applicato a un caso di studio particolarmente significativo all'interno del patrimonio edilizio scolastico del Comune di Bologna: la Scuola Media “Dozza”.

Il sistema di involucro *G-SKinnED* si basa sull'assemblaggio a secco di pannelli prefabbricati, composti da una struttura a trama esagonale, comprendenti uno strato di materiale termico isolante innovativo, denominato *AAM - Alkali Activated Material*, accoppiato a uno strato di rivestimento e protezione dagli agenti atmosferici, di supporto per la posa di un dispositivo “attivo” a base di vernice termocromica. Grazie all'aggiunta di questo strato isolante, è possibile riportare la struttura all'interno dei valori limite imposti dalla normativa, in termini di trasmittanza termica stazionaria U e periodica Y_{IE} [W/m²K] e di capacità termica areica C_{ip} [kJ/m²K].

L'intervento prevede l'aggiunta di uno strato termico isolante alle porzioni opache, con 10 cm di AAM in facciata e 5 cm di XPS in copertura, e, considerando l'elevato rapporto di finestra-

tura dell'edificio (pari al 60%), la sostituzione degli infissi metallici esistenti con infissi in PVC e vetri a camera doppia 4-12-4, maggiormente performanti.

Inoltre, l'intervento prevede dispositivi di auto-ombreggiamento di facciata e ombreggiamento interno alle aule, perfettamente integrati nell'involucro e variabili a seconda dell'orientamento e dell'esposizione alla radiazione solare, modellati mediante software di progettazione parametrica (*Rhinoceros+Grashopper*), connesso con il software analisi solare (*Ecotect Analysis*).

Le simulazioni svolte mediante software di analisi termica (*DesignBuilder+EnergyPlus*) dimostrano la possibilità effettiva di ottenere significativi miglioramenti prestazionali mediante l'applicazione della soluzione progettuale di involucro che, senza intervenire sugli impianti, riduce del 35% le dispersioni totali del fabbricato e, grazie alla riduzione del fabbisogno annuo di gas metano, comporta un risparmio annuo sui costi di gestione pari al 40%.

Dal computo metrico svolto nell'ambito dell'analisi dei costi-benefici, però, emerge che il costo dell'intervento sull'involucro opaco occupa il 45% del costo totale, in quanto si fonda sull'utilizzo della tecnologia innovativa della *3D Printing* che, attualmente, presenta ancora notevoli barriere economiche per la produzione di elementi di grande formato.

Tuttavia, si può ipotizzare che il tempo di ritorno semplice relativo al costo dell'intervento proposto, attualmente stimato intorno ai 26 anni, subisca un notevole ribasso in virtù del progressivo sviluppo di questa tecnologia e dei materiali utilizzati per la stampa che, durante i prossimi anni, potrebbero presumibilmente evolvere a tal punto da rendere economicamente accessibile questa soluzione di involucro.

Sulla base di queste considerazioni, si può concludere che, durante i prossimi anni, l'attuazione di un intervento di questo tipo potrebbe consentire, a fronte di una spesa ammortizzabile in un breve periodo, di ottenere i miglioramenti previsti: riqualificazione architettonica e personalizzazione degli edifici scolastici prefabbricati, grazie all'utilizzo di cromie e ombre variabili durante l'arco del giorno e dell'anno, e miglioramento prestazionale energetico, attraverso la progettazione customizzata di un componente di facciata capace di contribuire sinergicamente alla riduzione dei consumi energetici.

CONCLUSIONI

Le soluzioni progettuali elaborate a dimostrazione del processo innovativo proposto, sviluppate presso le due sedi coinvolte nella cotutela (Università di Bologna, Université Paris-Est) sono affrontate secondo un protocollo scientifico che prevede: progettazione del sistema costruttivo, analisi meccanica e termica, sperimentazione costruttiva, verifica delle tecniche di messa in opera e dei requisiti prestazionali.

Il primo sistema, costituito da cubi autobloccanti *TIM - Topologically Interlocked Materials*,

realizzati in materiale coibente e massivo AAM, sviluppato presso la sede francese di cotutela *Laboratoire GSA de l'ENSA Paris-Malaquais*, dimostra buone proprietà di resistenza meccanica e termica, oltre che qualità estetico-formali molto interessanti per il disegno di facciate. Nonostante le potenzialità emerse dal sistema di pannellatura in cubi autobloccanti, le sperimentazioni costruttive hanno messo in luce le criticità legate non tanto all'assemblaggio dei conci che, se configurati mediante l'impiego di macchine a controllo numerico CNC, consentono un rapido montaggio e una buona qualità dell'esito estetico finale, quanto al sistema di ancoraggio puntuale del sistema prefabbricato alla facciata esistente. Pertanto, stando allo stato dell'arte attuale delle ricerche, la reale applicabilità del sistema negli interventi di recupero dell'involucro risulterebbe eccessivamente onerosa in termini di tempo, risorse economiche e impiego di mano d'opera specializzata.

Il secondo sistema di involucro, denominato *G-SKinnED (Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design)*, studiato invece presso il CIRI - Edilizia e Costruzioni dell'Università di Bologna, presenta notevoli proprietà termiche e costruttivo-architettoniche. Infatti, i risultati ottenuti da tali simulazioni in regime dinamico dimostrano che questa soluzione porta a raggiungere un buon comportamento energetico, in termini di isolamento e inerzia termica, di controllo della temperatura superficiale di facciata, e dunque di benessere abitativo. I dati teorici ottenuti dimostrano che l'intervento elaborato, proposto dal progetto di ricerca per il caso specifico di studio, porta a effettivi guadagni in termini di fabbisogno energetico, oltre che di qualità estetica e architettonica. Nonostante il costo totale di intervento stimato sia particolarmente elevato in rapporto al tempo di ritorno semplice, sulla base del progressivo sviluppo degli strumenti di produzione basati sulla stampa digitale, che rappresentano la voce maggiormente incidente sul bilancio costi-benefici dell'intervento di recupero proposto, è possibile ipotizzare una riduzione sensibile dei costi relativi all'applicazione di questa tecnologia nel settore edile.

In linea con queste riflessioni, si può ipotizzare che, in un futuro prossimo, l'attuazione di un intervento di questo tipo possa raggiungere prezzi maggiormente accessibili che, a fronte di una spesa ammortizzabile in pochi anni, consenta di ottenere i miglioramenti previsti mediante l'impiego di questa soluzione di involucro "attivo".

La possibilità di gestire la totalità di questi fattori secondo un nuovo approccio integrato alla progettazione degli interventi sul costruito, mediante la connessione di diversi software di programmazione parametrica, costituisce un potenziale notevole per la realizzazione di involucri architettonici progettati "su misura", sulla base delle specificità morfologiche e costruttive di ogni singolo fabbricato, facilmente riproducibili mediante le moderne tecnologie di produzione e stampa digitale.

RÉSUMÉ ÉTENDU DE LA THÈSE

INTRODUCTION

Le projet de doctorat vise à présenter une nouvelle approche intégrée en support des opérateurs dans la gestion du processus de conception d'interventions de rénovation énergétique et architecturale du patrimoine bâti récent, grâce à l'emploi de solutions technologiques d'enveloppe innovantes.

La recherche se fonde sur la collection d'un répertoire sélectionné des solutions architecturales et constructives d'enveloppe, nécessaire pour constituer une base valide sur laquelle étudier des solutions technologiques novatrices pour la réhabilitation énergétique des écoles dans l'après-guerre, en béton armé, généralement préfabriquées.

Le projet identifie des processus constructifs écodurables pour la conception des composants de façade "active", adaptable et efficace, à assembler à sec, en conformité avec les exigences de performance requises par la réglementation actuelle. La recherche est finalisée à la gestion de l'ensemble du processus, soutenu par des systèmes de relevé géométrique, connectés aux logiciels de programmation paramétrique pour la modélisation des surfaces capables de s'adapter aux différentes morphologies du patrimoine existant. Ces outils informatisés CAO-FAO sont reliés aux machines à contrôle numérique CNC pour la fabrication des éléments de façade "sur mesure".

À démonstration de l'approche innovante proposée, deux possibles solutions d'enveloppe sont présentées, dans la ligne droite des principes de durabilité, comprise comme modularité, rapidité de mise en œuvre, réversibilité, récupération et réutilise des matériaux. En particulier, les solutions innovantes sont réunies par l'application d'une technique basée sur l'assemblage d'éléments préfabriqués, l'adoption d'un pavage hexagonal pour le dessin de la nouvelle surface d'enveloppe, et l'utilisation du même matériau isolant thermique, plastique et inorganique, recyclé, écodurable, à faible impact environnemental (*AAM - Alkali Activated Materials*).

PARTIE I - MATÉRIAUX ET TECHNIQUES

I. ÉTAT DE L'ART

Le premier chapitre aborde les thématiques générales nécessaires pour définir globalement le contexte de recherche dans lequel le projet s'insère, en relation à l'état de l'art des systèmes constructifs d'enveloppe et des matériaux isolants thermiques traditionnellement utilisés en construction.

La première partie est consacrée à la *Rénovation du patrimoine bâti publique récent*, qui

comprend les écoles publiques, traitée par rapport aux aspects de réglementation, aux performances actuelles, et aux critères d'intervention à adopter dans les interventions de réhabilitation. La délimitation des critères d'intervention vise à fournir un ensemble des paradigmes et instances de la recherche, promus par le projet comme principes directeurs à suivre pendant les interventions de réhabilitation énergétique durable du patrimoine bâti.

La deuxième partie concerne la *Rénovation des systèmes constructifs d'enveloppe*, adressée aux techniques constructives de rénovation énergétique employées pour les bâtiments existants, basées sur l'utilisation des matériaux et dispositifs capables d'attribuer un comportement "actif" à la façade. Par l'expression "actif", on entend un système capable d'assurer un comportement réglable et adaptable, capable d'interagir avec le contexte climatique extérieure, donc efficace en termes d'énergie.

En particulier, pour cette catégorie de façades il est fournie une classification des solutions technologiques de rénovation d'enveloppe actuellement utilisées dans le secteur de la construction, décrite selon un cadre descriptif qui comprend autant les systèmes de construction différents (enveloppe transparente, enveloppe opaque, système ventilé, système "à enduit acrylique", système vêtue, *shading screen*, enveloppe massive), que les différents matériaux utilisés pour la réhabilitation énergétique.

Cette description est présentée dans le but d'évaluer aussi les performances énergétiques et mécaniques, que les propriétés liées à l'impact environnemental et à la durabilité, entendue comme la quantité d'énergie stockée par les produits. Par rapport à l'énergie grise incorporée par chaque matériau, on estime donc la production d'énergie qui caractérise l'ensemble du processus comprenant la phase initiale d'extraction de la matière première, suivie par l'étape de production et de configuration, le transport sur chantier, l'installation et la mise en œuvre, jusqu'à la vie utile et à l'éventuel processus d'élimination finale.

À partir de l'analyse de l'état de l'art, il est possible de procéder à l'élaboration des solutions technologiques pour la rénovation de l'enveloppe de bâtiments, présentant des propriétés innovantes par rapport à leur composition constructive et aux matériaux écodurables employés.

II. PROCESSUS ET MÉTHODES POUR LA RÉNOVATION DE L'ENVELOPPE

Le deuxième chapitre illustre les processus et méthodes pour la rénovation des systèmes d'enveloppe, considérés à la base de l'approche innovante proposée pour les interventions de réhabilitation, à support pour les concepteurs et les opérateurs tout au long du processus, à partir de l'analyse jusqu'au projet et à sa réalisation finale.

Selon le schéma graphique de synthèse exprimé au début de ce chapitre, la première étape du processus concerne l'analyse de l'état actuel du patrimoine scolaire récent (1960-1980), compre-

nant le *Relevé géométrique et descriptif* et l'évaluation de l'état de conservation, afin de rédiger des fiches techniques, valides comme un point de départ pour la conception des interventions.

Après l'analyse préliminaire, il suit la phase de *Conception des interventions "sur mesure"* pour la rénovation des façades des bâtiments scolaires, réalisée selon une approche paramétrique à la conception de la morphologie de la deuxième enveloppe à juxtaposer aux façades existantes.

Une fois déterminée la géométrie de la nouvelle enveloppe du bâtiment, définie grâce à l'utilisation des logiciels paramétriques de haute précision, il est possible exporter les coordonnées géométriques, afin de créer un modèle virtuel sur lequel effectuer l'analyse mécanique et thermique. Ensuite, les résultats obtenus à partir de ces analyses numériques sont comparés aux résultats obtenus à partir des essais et mesures effectués sur des modèles réels, réalisées à la suite des étapes d'*Expérimentation constructive et prototypage*.

Cette phase constitue la partie essentielle du processus, vue qui représente la *Vérification des performances et des exigences de qualité de construction*.

La formulation de deux solutions d'enveloppe est fondamentale pour illustrer l'application du processus de conception, continu et intégré, proposé pour la rénovation des façades existantes. Ce processus est soutenu par l'utilisation de machines CNC pour la fabrication digitale d'éléments numériques conçus qui, grâce à l'utilisation d'interface CAO-FAO, permettent la transition du modèle virtuel à celui réel.

Par conséquent, le résultat final du projet de recherche ne porte pas sur l'élaboration de deux solutions d'enveloppe spécifiques, qui résulterait non seulement réductrice, mais aussi incomplète (puisque les techniques proposées exigeraient des analyses et vérifications plus approfondies), mais sur la présentation d'une nouvelle approche intégrée pour aider les opérateurs et les concepteurs à gérer l'ensemble du processus de conception des interventions de rénovation du patrimoine bâti récent.

III. EXPÉRIMENTATION CONSTRUCTIVE

La deuxième étape du processus de conception proposé se consacre à la thématique du projet des interventions "sur mesure" pour la rénovation du système de façade des bâtiments scolaires récents.

Actuellement la solution la plus utilisée dans les interventions de rénovation des enveloppes prévoit la réalisation d'une façade ventilée, composée par une structure à châssis qui sert comme support pour la pose de panneaux légers de revêtement. La recherche développée vise à l'élaboration d'un système technologique d'enveloppe alternatif, constitué par des éléments modulaires de façade agrafés au moyen d'un système de fixation mécanique ponctuel, afin d'obtenir une simplification des processus de mise en œuvre et une optimisation des performances.

Cet objectif est obtenu par l'utilisation d'une solution constructive à sec obtenue par l'assemblage d'éléments modulaires préfabriqués constituant une couche isolante/massive caractérisée par un matériau avec qualités de: plasticité, inorganicité, bon balance entre les performances thermiques et mécaniques, haute durabilité et impact environnemental réduit. En particulier, le projet se réfère au matériau isolant thermique géopolymérique (*AAM - Alkali Activated Materials*) caractérisé par les valeurs suivantes: densité $d = 200 \text{ kg/m}^3$, coefficient de conductivité thermique $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, capacité thermique massique $c_s = 1.080 \text{ J/kgK}$, coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau $\mu = 5$, et résistance mécanique en compression $R_c = 3,5 \text{ MPa}$.

La formulation de deux systèmes technologiques intégrés pour l'amélioration des performances énergétiques de façade est essentielle pour illustrer l'application du processus de conception proposée pour la rénovation du patrimoine bâti, selon une approche innovante, constituée par une phase théorique approfondie, inextricablement liée à l'étape pratique finale.

Les deux études sur les systèmes d'enveloppe présentés dans la Thèse, bien que caractérisées par un concept différent de construction, présentent des caractéristiques communes à l'égard soit du respect des conditions mentionnées ci-dessus, soit de la poursuite d'une ligne de recherche qui combine la phase de recherche théorique avec les expérimentations menées en laboratoire.

Le I^e Système innovant de façade constitué par des cubes autobloquants *TIM - Topologically Interlocked Materials* est envisagé sous la direction du Laboratoire GSA - Géométrie Structure Architecture de l'ENSAPM - École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais, consacré au développement des thématiques de recherche scientifique selon une approche géométrique et structurelle aidée par les logiciels d'analyse mécanique, suivie par la validation finale du modèle à travers de la réalisation des prototypes. La technologie constructive à sec est basée sur l'assemblage des blocs identiques autobloquants qui restent dans leur position au moyen de l'action des forces échangées mutuellement grâce à leurs propriétés géométriques. Ce système d'assemblage présente un grand potentiel par rapport au développement des solutions constructives innovantes caractérisées par une bonne résistance mécanique, en ouvrant nouvelles possibilités formelles dans le domaine de conception des structures et matériaux. L'aspect novateur de la recherche ne consiste pas seulement à l'application du principe autobloquant, habituellement utilisé pour les éléments constructifs horizontaux bidimensionnels (comme dalles, planchers et toitures) aux éléments verticaux de façade, mais aussi à l'utilisation du matériau innovant géopolymérique écodurable (*AAM - Alkali Activated Material*). L'étude des systèmes constructifs de façade est complétée par l'insertion du projet dans le rapport de collaboration avec Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau (Villefontaine, Lion), dont il est possible la création et la validation des modèles étudiés, à travers des mesures et tests de charge.

Le II^e Système innovant de façade avec texture hexagonale *G-SKinnED (Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design)* est étudié en collaboration avec le CIRI - Bâti-

ments et Construction de l'Université de Bologne, dont il est possible l'expérimentation directe du matériau innovant géopolymérique pour l'isolation thermique. En particulier, le système proposé est constitué par des panneaux préfabriqués composés par une structure à trame hexagonale, en matériau recyclé (plastique à renfort de verre, fibre de verre) léger et résistant, fabriqués avec l'impression 3D des modèles numériques CAO. Chaque panneau à trame hexagonale extrudée présente le double rôle d'attribuer rigidité à flexion et de faire fonction de coffrage "à perdre" pour contenir le matériau isolant plastique. La géométrie singulière hexagonale du panneau permet d'obtenir un particulier système d'emboîtement entre les panneaux et, donc, une réduction des éléments de connexion entre les composants et entre les panneaux et la façade existante, avec des conséquences bénéfiques aussi en termes de réduction des ponts thermiques. En outre, la durabilité du système de façade consiste dans l'emploi du matériau isolant innovant géopolymérique, inorganique, plastique et écodurable AAM, obtenu par le recycle des poussières dérivées par les déchets de production de briques, alcalinement activées à température ambiante, donc avec un impact environnemental réduit.

PARTIE II - ANALYSE ET PROJET

IV. UN ÉTUDE DE CAS. LE PATRIMOINE BÂTI SCOLAIRE DE BOLOGNE

Par rapport au processus de conception proposée, ce chapitre en illustre la première phase, consacrée à la reconnaissance et à l'analyse des bâtiments existants objet de l'intervention, en se focalisant sur le système constructif d'enveloppe. Afin de constituer un cadre descriptif complet et un bon point de départ pour la conception des interventions, il est fournie l'analyse de bâtiments, comprenant le relevé descriptif et géométrique, suivie par l'évaluation de l'état conservatif réalisée sur la base d'un protocole rapide.

La première partie se focalise sur les *Bâtiments scolaires*, en particulier sur les écoles construites à Bologne, qui ont été individuées par la recherche pour leurs caractéristiques architecturales très intéressantes parmi le patrimoine bâti récent. Selon les données fournies au cours du dernier rapport annuel de *Legambiente Ecosistema Scuola*, les deux tiers des bâtiments scolaires existants ont été bâtis entre 1940 et 1990 et n'ont jamais subi des interventions importants de rénovation et mise en conformité. Il s'agit donc des bâtiments qui aujourd'hui présentent beaucoup de problèmes à niveau esthétique et architectural, énergétique, et aussi mécanique et structurel (en relation aussi aux récents événements sismiques de mai 2012, en la région Emilie-Romagne, au nord d'Italie). La recherche vise à mener une investigation préliminaire à caractère systémique, focalisée sur des multiples clés de lecture: chronologique et temporelle, figurative, typologique et dimensionnelle, constructive, par rapport aux performances. En effet, dans le cadre de la rénova-

tion du patrimoine bâti, la première opération à effectuer concerne l'évaluation rapide de l'objet d'étude par rapport à son état conservatif et à ses performances (énergétiques et structurelles), afin d'obtenir un cadre descriptif complet pour une approche adéquate à la conception des interventions. Ce recueil de renseignements, principalement dédié à l'enveloppe des bâtiments analysés, représente donc une sorte de dictionnaire technique pour la formulation des solutions technologiques innovantes proposée dans la phase finale de la Thèse (*Annexe - Fiches anagraphiques et de relevé*).

La deuxième partie du chapitre aborde la *Construction préfabriquée (1960-80)*, représentant la technologie constructive principalement employée pour les bâtiments scolaires consacrés au collège, objet d'étude et de programmation d'interventions. La plupart de ces écoles a été construite pendant les années 1960 et 1980, principalement réalisée au moyen des techniques de préfabrication (totale ou partielle) en béton armé pour la structure portante, terminée avec des panneaux préfabriqués en béton armé et autres matériaux. Il s'agit des structures caractérisées par une enveloppe présentant un aspect actuellement très décadent, avec des signes importants de dégradation à niveau structurel, constructif et esthétique-architectural. En ce qui concerne les systèmes d'acquisition de données, des différentes méthodes de recherche ont été employées pour la reconnaissance des éléments principaux: recherches d'archive; recherches bibliographiques et consultation des livres, magazines, catalogues, annuaires et cahiers de la municipalité de Bologne; inspections rapides et investigations directes dans les lieux.

La troisième partie du chapitre concerne l'*Évaluation de l'état conservatif et des performances* du patrimoine scolaire bâti à Bologne, rédigée sur la base de la documentation d'archive et des photographies acquises pendant les inspections des lieux. En suite à cette évaluation préliminaire, la rédaction des fiches techniques de relevé et d'évaluation rapide des performances fournit une synthèse descriptive finale. La méthodologie d'investigation du patrimoine se base sur la nécessité d'obtenir un rapport complet sur l'évaluation de chaque bâtiment en termes de qualité et quantité, comprenant l'analyse exhaustive des dégradations visibles, en se focalisant sur l'enveloppe, considérée la composante constructive fondamentale par rapport aux performances. Ce rapport se traduit dans la réalisation des relevés géométriques des bâtiments dans leur contexte urbanistique, déroulées en employant les outils de relevé (photogrammétrie et laser scanner), accompagnés par le matériau photographique recueilli pendant les inspections. Ces fiches techniques fournissent une classification efficace des trente bâtiments scolaires analysés, finalisée à l'individuation d'actions et stratégies d'intervention pour la rénovation, au moyen de l'utilise de solutions d'enveloppe. En effet, afin de rédiger ces fiches techniques, il est indispensable que le relevé de chaque bâtiment soit intègre par les documents originaux de projet pour vérifier les informations liées aux parties inaccessibles, après avoir vérifié l'éventuel déroulement de travaux de réhabilitation. Par conséquent, il est essentiel l'élaboration d'un protocole à suivre pour procéder à une analyse à caractère systématique, grâce à laquelle compléter des fiches techniques contenant la description et l'évaluation

de l'état de conservation de: structures portantes, systèmes d'enveloppe verticaux et horizontaux, transparents et opaques, cloisons internes verticales et horizontales, installations techniques et tous les autres éléments constitutifs le bâtiment, jusqu'aux détails de construction.

Comme indiqué dans la quatrième partie de ce chapitre concernant les *Critères de conception des interventions*, l'acquisition d'un répertoire sélectionné de solutions typologiques et constructives du patrimoine scolaire récent permet d'identifier les problèmes les plus importants liés au système d'enveloppe, et donc de définir les critères de conception à adopter pour les interventions de rénovation. Une étude attentive et consciente des stratégies d'intervention sur les bâtiments existants ne peut pas faire abstraction d'une analyse approfondie du contexte existant, et donc de l'écriture d'un cadre synthétique, capable de retourner une image descriptive complète et précise.

V. LE PROJET D'INTERVENTION POUR L'ÉCOLE SECONDAIRE "DOZZA"

Ce projet de recherche vise à illustrer un nouveau processus de conception pour la rénovation de l'enveloppe du patrimoine bâti récent, à partir du relevé métrique des bâtiments existants, jusqu'à la formulation finale d'un système constructif modulaire, adaptable et applicable à plusieurs cas similaires de réhabilitation de façade.

Après une analyse critique attentive des deux solutions novatrices proposées, représentant le résultat final d'un processus continu et intégré, dans ce dernier chapitre il est présenté le projet de rénovation basé sur le II^e système innovant de façade, appelé *G-SKinnED*, appliqué à l'étude d'un cas particulièrement considérable dans le patrimoine bâti scolaire de Bologne: l'École secondaire "Dozza".

Le système d'enveloppe *G-SKinnED* est basé sur l'assemblage à sec des panneaux préfabriqués, composés par une structure hexagonale, comprenant une couche de matériau isolant thermique innovant, appelé *AAM – Alkali Activated Material*, associé à une couche de revêtement et protection contre les agents atmosphériques, servant pour la mise en œuvre d'un dispositif "actif" à base de peinture thermochromique. Grâce à l'ajout de cette couche isolante, il est possible d'amener la structure dans les limites imposées par la réglementation actuelle, en termes de coefficient de transmission thermique stationnaire U et périodique Y_{IE} [W/m²K] et de capacité thermique areïque C_{ip} [kJ/m²K].

En particulier, le projet comprend l'ajout d'une couche d'isolation thermique pour les parties opaques avec 10 cm d'AAM en façade et 5 cm de XPS dans la couverture et, compte tenu de la forte proportion de fenêtres du bâtiment (60%), le remplacement des cadres existants en métal avec des châssis plus performants en PVC avec double vitrage 4-12-4.

En outre, le projet prévoit des dispositifs d'auto-ombrage de façade et d'ombrage de l'intérieur des salles de classe, parfaitement intégrés dans l'enveloppe et variables en fonction de l'orien-

tation et de l'exposition au rayonnement solaire, modélisés au moyen de l'emploi de logiciels de conception paramétrique (*Rhinoceros+Grashopper*), connectés avec le logiciel d'analyse solaire (*Ecotect Analysis*).

Les simulations effectuées par les logiciels d'analyse thermique (*DesignBuilder+EnergyPlus*) démontrent l'opportunité effective d'obtenir des améliorations significatives de performance, grâce à l'application de la solution d'enveloppe proposée qui, sans agir sur les installations, réduit de 35% la dispersion totale de l'immeuble, ainsi que les besoins annuels de gaz méthane, en comportant une économie annuelle de 40% sur les coûts de gestion.

Les estimations faites dans le contexte d'analyse coûts-avantages, toutefois, montrent que le coût de l'intervention sur les parties opaques d'enveloppe occupe 45% du coût total, car il est basé sur l'utilisation de la technologie innovante de l'impression 3D, qui actuellement présente encore des obstacles économiques considérables pour la production d'éléments de grand format.

Cependant, on peut supposer que le temps de retour simple concernant le coût de l'intervention proposée, estimé actuellement à 26 ans, puisse baisser considérablement en raison du développement progressif de cette technologie et des matériaux utilisés pour l'impression tridimensionnelle qui, lors des prochaines années, pourraient évoluer au point de rendre cette solution d'enveloppe économiquement abordable.

Sur la base de ces considérations, on peut conclure que, dans les prochaines années, la mise en œuvre d'une intervention de ce type pourrait permettre d'obtenir les améliorations attendues, avec une dépense amortissable sur une courte période: la rénovation architecturale et la personnalisation des bâtiments scolaires préfabriqués, grâce à l'étude des couleurs et des ombres, variables pendant la journée et l'année, et l'amélioration énergétique, grâce à la conception d'un panneau de façade capable de contribuer de façon synergique à la réduction de la consommation d'énergie.

CONCLUSIONS

Les solutions présentées à démonstration de l'approche proposée, développées dans les sièges de cotutelle (Université de Bologne, Université Paris-Est) sont envisagées selon un protocole scientifique qui prévoit: conception du système constructif, analyse mécanique et thermique, expérimentation constructive, validation des techniques de mise en œuvre et des performances.

Le premier système, constitué par des cubes autoclavants *TIM - Topologically Interlocked Materials*, développé auprès du Laboratoire GSA de l'ENSA Paris-Malaquais, montre non seulement une bonne résistance mécanique et thermique, mais aussi des qualités esthétiques et géométriques très intéressantes pour la réalisation de façades. Malgré les potentiels de ce système de panneaux, les expérimentations constructives ont mis en évidence les difficultés liées non seulement à l'assemblage des blocs, qui doivent être préfabriqués grâce à l'utilise des machines à haute

précision pour garantir la mise en œuvre rapide et de qualité, mais surtout au système d’ancrage à la façade existante. En conséquence, l’applicabilité réelle de ce système d’enveloppe dans les interventions de rénovation de bâtiments serait trop onéreuse en termes de temps, de ressources économiques et d’emploi de main-d’œuvre qualifiée.

Le deuxième système d’enveloppe, appelé *G-SKinnED (Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design)*, étudié en collaboration avec le centre de recherche CIRI - Bâtiments et Constructions de l’Université de Bologne, présente aussi des propriétés notables thermiques et architecturales. En effet, les résultats obtenus à partir des simulations dynamiques montrent que cette solution permet d’obtenir des bonnes propriétés énergétiques, en termes d’isolation et d’inertie thermique, de contrôle de la température de la surface de façade, et donc de confort intérieur. Les résultats théoriques obtenus démontrent que l’intervention développée par le projet de recherche, proposée pour l’étude de cas spécifique, conduit à des gains réels en termes de besoins énergétiques, ainsi que de qualités architecturales et esthétiques. Malgré le coût total de cette intervention innovante soit particulièrement élevé par rapport au temps de retour simple, sur la base du développement progressif des outils de production basés sur l’impression 3D, il est possible de supposer une réduction significative des coûts relatifs à l’application de cette technologie dans le secteur de la construction.

Dans la ligne droite de ces réflexions, on peut supposer que, dans un très proche avenir, la mise en œuvre d’une intervention de ce type puisse devenir plus abordable et que, face à une dépense amortissable en quelques années, permette d’obtenir les résultats recherchés par l’utilisation de cette système innovant d’enveloppe “active”.

La capacité à gérer l’ensemble de ces facteurs selon une nouvelle approche intégrée à la conception des interventions sur le patrimoine bâti existant, grâce à la connexion de multiples logiciels de programmation paramétrique, constitue un potentiel considérable pour la réalisation d’enveloppes architecturales “sur mesure” sur la base des spécificités morphologiques et constructives de chaque bâtiment existant, à reproduire en utilisant les technologies modernes d’impression digitale 3D.

Introduzione
Introduction

I AMBITO SCIENTIFICO-DISCIPLINARE

Il progetto di ricerca si svolge nell'ambito disciplinare di Architettura Tecnica (ICAR/10), afferente al Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna.

Grazie al percorso formativo svolto durante il Corso di Studi in Ingegneria Edile-Architettura, concluso con una Tesi di Laurea in Recupero e Conservazione degli Edifici, all'interno dello stesso ambito, la candidata prosegue la sua formazione universitaria in linea con la volontà di approfondire maggiormente questa disciplina. Il particolare interesse maturato verso questa tipologia di interventi e il desiderio di intraprendere un percorso verso una sempre maggiore specializzazione nel settore ha condotto alla ricerca di un tema che consentisse di raggiungere una conoscenza più ampia in questo ambito.

Il rapporto di collaborazione, ormai da anni consolidato, tra il Dipartimento di Architettura di Bologna e il *Laboratoire GSA - Géométrie Structure Architecture* dell'*École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais* (Parigi) ha consentito di effettuare un percorso di ricerca che presentasse caratteri di originalità e concretezza, con un indirizzo prettamente rivolto tanto all'analisi teorica e alla progettazione, quanto alla conseguente realizzazione pratica e verifica strutturale, fino alla definizione del titolo di Tesi proposto.

Gli strumenti di supporto riconosciuti¹ per lo svolgimento dei periodi di ricerca all'estero per la conduzione di Tesi di Dottorato in cotutela hanno consentito di sviluppare il progetto presso il *Laboratoire GSA* di Parigi, offrendo inoltre la possibilità - unica nel suo genere - di svolgere l'esperienza pratica di partecipazione a un cantiere per la conduzione di sperimentazioni costruttive, parte essenziale del percorso di ricerca. Il cantiere, infatti, è il luogo in cui si svolge la verifica ultima dell'appropriatezza delle scelte compiute e dove i diversi linguaggi che confluiscono nella definizione del processo progettuale ritrovano uno spazio comune di dialogo e confronto. Affinché si compia questo passaggio, è necessario acquisire e promuovere una conoscenza non solo tecnica, ma anche pratica, dei processi costruttivi².

Lo studio e l'approfondimento dei sistemi costruttivi di facciata proposti rientrano in un ampio campo di ricerca in cui si muove il GSA, e si completa inserendosi all'interno di un più vasto progetto di collaborazione con *Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau* (Villefontaine, Lione), presso i quali è possibile la realizzazione dei modelli costruttivi studiati e la loro verifica strutturale, mediante lo svolgimento di misurazioni e prove di carico.

¹ Supporti ricevuti per lo svolgimento della Tesi di Dottorato in cotutela:

- *Bando Vinci 2012 - Capitolo II - Contributi di mobilità per tesi di Dottorato in cotutela* - Borsa di studio erogata dall'Università Italo-Francese (Torino);
- *Bando Marco Polo 2014 - Incentivi alla mobilità per la ricerca* - Borsa di studio erogata dal Dipartimento di Architettura della Scuola di Ingegneria e Architettura dell'Università degli Studi di Bologna.

² Marconi P., *Il punto di vista di un restauratore*, in "Manutenzione e recupero della città storica", Atti del Convegno ARCo, 7-8 maggio 1999, Roma, p.25.

Nato nel 1990 da differenti competenze professionali, sotto forma di *équipe*, il Laboratorio GSA si è progressivamente sviluppato, avanzando nell'ambito delle ricerche strutturali e costruttive, fino a diventare nel 1998 un laboratorio, dopo l'abilitazione del *Bureau de la Recherche Architecturale*. Attualmente esso rappresenta una delle strutture di ricerca più avanzate a livello europeo in ambito architettonico, per la completezza dell'approccio adottato nello studio delle strutture. Tale sede si dedica allo sviluppo di tematiche di ricerca scientifica relative al campo dell'architettura e dell'ingegneria, intimamente legate alla geometria delle strutture e alla fisica dei materiali, alla storia della costruzione e alla sperimentazione costruttiva.

La geometria, e in particolare i suoi rapporti con la costruzione, costituiscono il denominatore comune per tutti i membri del *Laboratoire GSA*. Uno dei due principali assi di ricerca che il laboratorio attualmente segue, oltre alla Cultura Costruttiva, consiste nella Morfologia Strutturale, che comprende lo studio e la modellazione di strutture architettoniche, tra cui l'involucro edilizio. Il laboratorio è volto principalmente agli aspetti geometrici e strutturali, come componenti fondatrici del linguaggio architettonico e linee guida delle ricerche condotte, affrontate secondo un approccio al contempo teorico, storico, scientifico e sperimentale. Lo studio delle strutture viene affrontato secondo un approccio geometrico e strutturale, supportato da software di analisi meccanica, imprescindibilmente seguito da una validazione del modello attraverso la realizzazione di prototipi.

Una riflessione determinante per l'approdo alla scelta della sede estera con cui instaurare un rapporto di cotutela ha riguardato proprio la tradizione dell'esperienza didattica francese³, importante riferimento da cui apprendere, finalizzata a tutelare e sostenere la diffusione di una cultura costruttiva. Il panorama culturale francese, infatti, grazie alla propria lunga tradizione, favorisce l'approccio diretto a tutte le tecniche costruttive legate all'utilizzo dei materiali tradizionali e innovativi, continuando a far prevalere tuttora, tanto nelle esperienze universitarie e accademiche, quanto nei laboratori di ricerca e negli studi professionali, questa linea di approccio costruttivo, che si ritiene costituisca un aspetto fondamentale della formazione personale.

Queste connotazioni, affiancate alla possibilità offerta dalla struttura francese di usufruire di grandi laboratori, rende il *Laboratoire GSA* la sede idonea per condurre lo studio di sistemi tecnologici innovativi, grazie alla collaborazione tra l'Università di Bologna e l'*Université de Paris-Est*, prevista dalla convenzione di cotutela.

3 Si vedano due delle più note associazioni francesi dedicate alla formazione di maestranze qualificate in ambito di Restauro architettonico: *Compagnonnage du Devoir*; *Section Monuments Historiques de St. Lambert de Paris*.

II CAMPO DI INDAGINE

Dopo approfondite analisi e valutazioni in merito al patrimonio edilizio esistente verso cui rivolgere la ricerca di tecniche innovative per il miglioramento delle prestazioni dell'involucro, il progetto si è orientato verso l'edilizia scolastica, in linea con le considerazioni riportate di seguito.

In un'epoca storica in cui l'attenzione rivolta verso l'ambiente costituisce un elemento primario da considerare per una corretta gestione degli interventi edilizi, si avverte la necessità di un consolidamento delle politiche di efficienza prestazionale e qualità architettonica. All'interno del patrimonio edilizio esistente, gli edifici scolastici occupano una vasta porzione dell'intero settore ma, ciò nonostante, soltanto raramente vengono coinvolti nei progetti di investimento a scala nazionale.

I dati rilevati durante l'ultimo Rapporto annuale di Legambiente "Ecosistema Scuola" rappresentano chiaramente l'entità del fenomeno: i due terzi dell'edilizia scolastica esistente sono costituiti da edifici costruiti durante il periodo compreso tra il 1940 e il 1990 e, nel tempo, la maggior parte di questi non ha subito sostanziali trasformazioni e adeguamenti.

Si tratta di organismi edilizi che attualmente presentano molteplici problematiche, legate alla sicurezza statica e alla vulnerabilità sismica (emerse in maniera eclatante proprio negli ultimi tempi, in occasione del sisma che ha colpito l'Emilia⁴), al consumo di risorse energetiche, al comfort ambientale interno, alle condizioni di fruizione e sicurezza, alle qualità estetiche e architettoniche, e alla loro gestione da parte degli Enti preposti. In base al grado di istruzione, infatti, le scuole vengono gestite dal Comune, nel caso di scuole d'infanzia (Asili nido, Materne), primarie (Elementari) e secondarie di primo grado (Medie), o dalla Provincia, nel caso di scuole secondarie di secondo grado (Superiori).

Nel periodo dopo la guerra e durante tutti gli anni Sessanta, la necessità di risolvere la carenza di strutture adeguate tanto per le attività residenziali, quanto per i servizi e i luoghi di istruzione, ha portato a fornire risposte immediate provenienti da una situazione di urgenza: la ricerca di soluzioni ottimali, in termini temporali ed economici, spesso si è però inevitabilmente realizzata a

⁴ Il 20 maggio 2012, alle ore 4:04, un terremoto di magnitudo 5.9 interessa i territori dell'area nord della Penisola italiana, prevalentemente nei Comuni delle Province di Modena e Ferrara e, in misura minore, in quelli di Bologna e Mantova. In base alle registrazioni dell'INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, l'epicentro della scossa principale viene localizzato tra i Comuni di Finale Emilia e San Felice sul Panaro (provincia di Modena), e Sermide (provincia di Mantova). I Comuni interessati dall'evento sono classificati in zona 3 (bassa pericolosità), secondo la delibera del Consiglio Regionale dell'Emilia Romagna n. 1435 del 21 luglio 2003. Il 22 maggio il Consiglio dei Ministri delibera lo stato di emergenza per i territori delle province di Ferrara, Modena, Mantova e Bologna e ne fissa la durata a 60 giorni. Dopo pochi giorni dalla prima forte scossa, il 29 maggio alle ore 9:00 si verifica un nuovo evento sismico in provincia di Modena di magnitudo 5.8. Diverse repliche interessano anche le Province di Reggio Emilia e Mantova, tra cui una scossa alle 12:55 di magnitudo 5.3. (Rassegna stampa della Protezione Civile, 30/05/2012)

discapito della qualità architettonica e urbanistica. È dunque necessario oggi cogliere l'opportunità di riprendere i lavori appartenenti a questa epoca, rivedendone i caratteri tipologico-costruttivi, al fine di conferire loro la qualità architettonica che talvolta non hanno mai posseduto⁵.

Purtroppo, però, spesso gli Enti pubblici di competenza non riescono a gestire adeguatamente il patrimonio attraverso opportune strategie di programmazione degli interventi, optando per azioni



[Fig. 1] (Sopra) Viste esterne dell'Istituto Comprensivo "Dozza" (Quartiere Reno).

[Fig. 2] (Sotto) Viste interne ed esterne dell'Istituto Comprensivo "Pepoli" (Quartiere Santo Stefano).

5 Duot F., Lacaton A. & Vassal J.-P. , *Plus*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.

immediate di somma urgenza, necessarie per il proseguimento delle attività scolastiche, da eseguire in seguito a eventi dannosi, in termini di degrado delle strutture e di sicurezza dell'utenza. È evidente come questa logica diffusa impedisca una adeguata riqualificazione e manutenzione degli edifici scolastici, portando così, nel corso degli anni, a un progressivo peggioramento dello stato conservativo degli organismi.

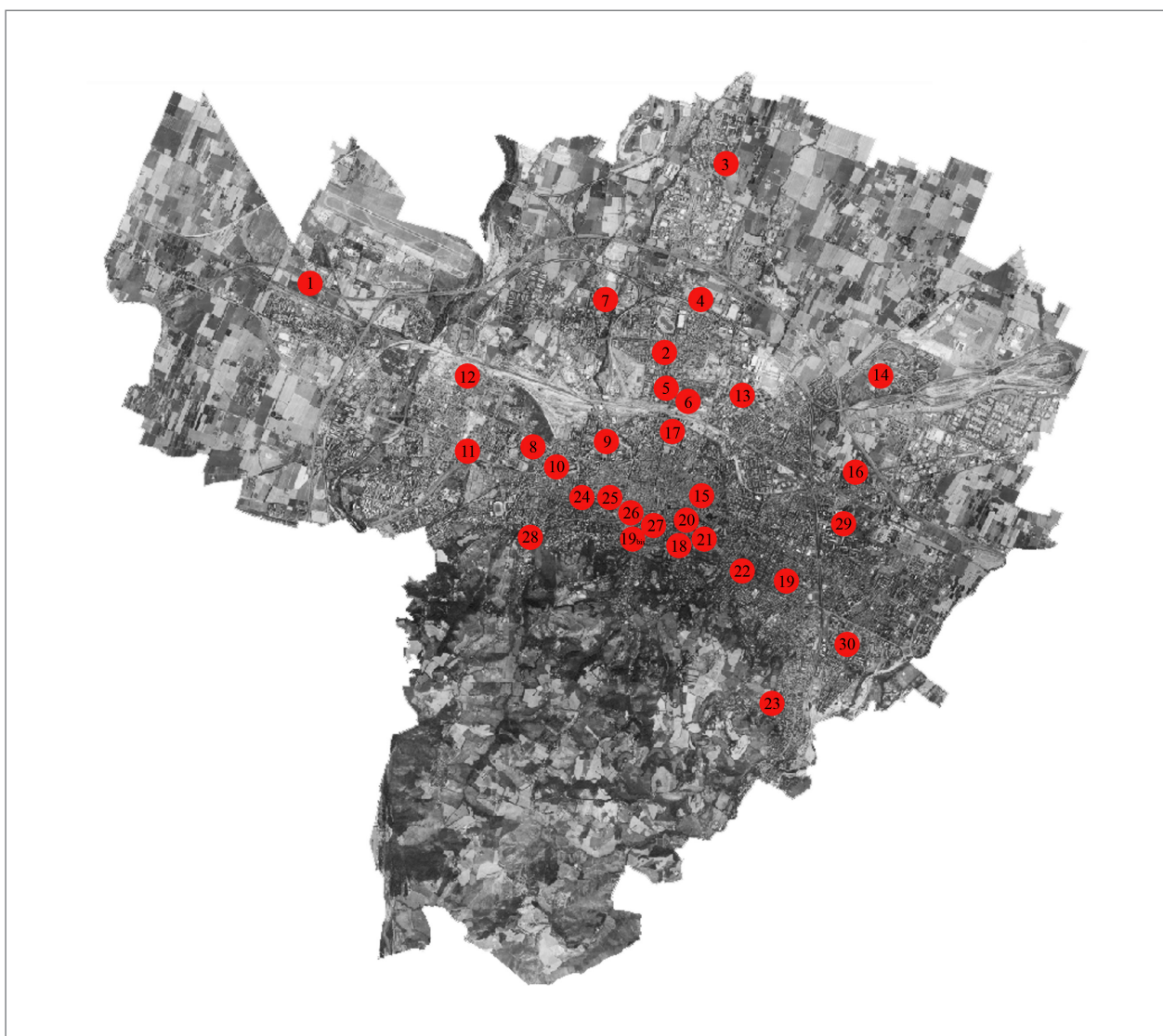
In questo contesto acquisisce grande importanza la possibilità di disporre di strumenti e metodi per la valutazione speditiva dello stato conservativo dei fabbricati opportunamente classificati, e per la conseguente programmazione degli interventi di miglioramento. La progettazione programmata di interventi sostanziali di adeguamento strutturale, di riqualificazione energetica e architettonica, nell'ottica di una ottimizzazione dell'impiego di risorse, porterebbe non soltanto a un innalzamento della qualità edilizia degli edifici scolastici, ma anche al miglioramento della gestione delle risorse economiche di cui gli Enti gestori dispongono.

In particolare, la ricerca si focalizza sugli edifici dedicati all'insegnamento della scuola secondaria di primo grado, in quanto rappresentano il patrimonio edilizio scolastico oggetto di programmi di finanziamento e progettazione propri del Comune, e non delle Province o della Regione, come invece accade nel caso della scuola secondaria di secondo grado.

Una ulteriore rilevante considerazione ha guidato la scelta di ridurre il campo di indagine all'edilizia scolastica. Gli obiettivi della ricerca riguardanti le tecniche innovative per il miglioramento delle prestazioni dell'involucro, di natura più prettamente tecnico-ingegneristica, hanno portato a concentrare l'interesse verso edifici che, per tipologia edilizia e relative normative di riferimento, presentassero morfologie semplici e un ridotto numero di livelli (uno o due piani) [Fig. 1, 2]. È evidente che, su un oggetto esistente di ridotta altezza, risulta più semplice affrontare tematiche relative allo studio di nuove tecniche per soluzioni di involucro esterno, principalmente in relazione alle problematiche relative alle caratteristiche meccaniche e strutturali della nuova "pelle tecnologica".

Inoltre, un'altra motivazione che ha orientato la scelta di rivolgere gli interventi di recupero verso il patrimonio edilizio scolastico risiede nel duplice aspetto edilizio-impiantistico e pedagogico, ossia nella possibilità di intervenire in un ambiente preposto per l'istruzione e per la diffusione dei principi di sostenibilità e di utilizzo consapevole delle risorse energetiche.

Infine, come è stato rilevato dalle analisi sul campo, la maggior parte degli edifici destinati ad accogliere le scuole secondarie di primo grado è stata realizzata durante il periodo compreso tra 1960 e il 1980. Tali edifici presentano prevalentemente un telaio in conglomerato cementizio armato e tamponamenti in pannelli prefabbricati in c.a. e altri materiali. Si tratta di strutture dall'aspetto attualmente molto decadente che, presentando segni di degrado a livello sia strutturale-costruttivo, sia estetico-architettonico, costituiscono un oggetto di studio adeguato per le ricerche morfologiche sviluppate dal progetto.



[Fig. 3] Collocazione delle trenta scuole secondarie di primo grado (Scuole Medie), oggetto di studio, presenti nel territorio comunale di Bologna:

- | | |
|--|--|
| 1. I.C. n.14 "Volta" - Borgo Panigale | 16. I.C. n.7 "Jacopo della Quercia" - S. Vitale |
| 2. I.C. n.5 "Testoni-Fioravanti" - Navile | 17. I.C. n.6 "Irnerio" - S. Vitale |
| 3. I.C. n.4 "Panzini" - Navile | 18. "Rolandino de' Passaggeri" - S. Stefano |
| 4. I.C. n.15 "Zappa" - Navile | 19. "Pepoli" - S. Stefano |
| 5. "Beata Vergine di San Luca" - Navile | 20. "Cerreta" - S. Stefano |
| 6. I. "Maria Ausiliatrice" - Navile | 21. I. "Figlie Sacro Cuore di Gesù" - S. Stefano |
| 7. I.C. n.3 "Salvo D'Acquisto" - Porto | 22. I. "San Giuseppe" - S. Stefano |
| 8. I.C. n.18 "De Andrè-Ex Alighieri" - Porto | 23. I.C. n.13 "Leonardo da Vinci" - S. Stefano |
| 9. I.C. n.17 "Gandino" - Porto | 24. "Malpighi" - Saragozza |
| 10. "Santa Teresa del Bambin Gesù" - Porto | 25. I.C. n.8 "Guinizelli" - Saragozza |
| 11. I.C. n.1 "Dozza" - Reno | 26. "Sant'Alberto Magno" - Saragozza |
| 12. I.C. n.2 "Zanotti" - Reno | 27. "San Luigi" - Saragozza |
| 13. I.C. n.10 "Besta" - S. Donato | 28. I.C. n.8 "Carracci" - Saragozza |
| 14. I.C. n.11 "Saffi" - S. Donato | 29. I.C. n.12 "Farini" - Savena |
| 15. I.C. n.16 "Guido Reni" - S. Donato | 30. I.C. n.9 "Guercino" - Savena |

In questo contesto si avverte l'esigenza di focalizzarsi su un nuovo tipo di approccio al disegno di facciate, modulate da morfologie che consentano di superare l'impiego diffuso di criteri costruttivi basati su una marcata semplificazione formale di soluzioni architettoniche, fondate sull'assemblaggio di elementi piano-lineari per l'involucro edilizio. Si rivolge l'attenzione allo studio di un metodo finalizzato all'elaborazione di forme più complesse, adattabili alla configurazione spaziale tipologica esistente, quali quelle ottenibili tramite una maglia esagonale, per la realizzazione di un nuovo involucro edilizio continuo. La ricerca si orienta verso strutture ad alta ecosostenibilità, costituite da materiali innovativi di riciclo, abbinate all'uso di cromie come elementi di caratterizzazione spaziale emblematica degli edifici scolastici, che potrebbero rappresentare un elemento di valorizzazione e caratterizzazione del patrimonio edilizio. Malgrado la neutralità morfologica tipica degli edifici scolastici prodotti dalle sperimentazioni di prefabbricazione, lo studio di questo repertorio solleva interessanti considerazioni sulla validità architettonica delle opere edili e sulla loro "personalizzabilità" mediante interventi di recupero capaci di coniugare operazioni di sintesi compositiva con processi di produzione industrializzata dei componenti seriali di facciata.

Al contempo, si avverte la necessità di approfondire lo studio di strumenti e metodi operativi per gli interventi di recupero e riqualificazione architettonica del patrimonio edilizio scolastico recente, mediante l'impiego di soluzioni eco-compatibili, per il miglioramento delle prestazioni energetiche e del comportamento strutturale dell'involucro.

In particolare, si considerino le trenta scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) presenti nel territorio del Comune di Bologna [Fig. 3].

Il progetto di ricerca sviluppato è rivolto alla riqualificazione di dodici edifici scolastici scelti all'interno di questo patrimonio edilizio scolastico, selezionati per la tecnica costruttiva prevalentemente prefabbricata, con la quale sono stati realizzati⁶.

A partire da una approfondita analisi delle diverse particolarità costruttive e tecnologiche, architettoniche e funzionali degli edifici scelti, la ricerca è volta all'elaborazione di soluzioni progettuali che siano riproducibili e adattabili ad altri edifici e contesti analoghi, e confrontabili con quelli di progetto per patologie edilizie, tecnologie costruttive, elevati consumi energetici, degrado urbano e disagio sociale.

L'obiettivo consiste nell'elaborazione di un processo da adottare nel campo del recupero degli edifici recenti, in grado di rispondere, attraverso interventi di adeguamento tecnologico, funzionale ed architettonico, alle problematiche lasciate in eredità dagli interventi realizzati durante gli anni Sessanta e Ottanta, prestando attenzione tanto alle tematiche costruttive e strutturali, quanto a quelle ambientali.

⁶ Undici edifici scolastici prevalentemente prefabbricati oggetto di studio: I.C. n.14 "Volta" - Borgo Panigale, I.C. n.15 "Zappa" - Navile, I.C. n.3 "Salvo D'Acquisto" - Porto, I.C. n.1 "Dozza" - Reno, I.C. n.2 "Zanotti" - Reno, I.C. n.10 "Besta" - S. Donato, I.C. n.11 "Saffi" - S. Donato, I.C. n.7 "Jacopo della Quercia" - S. Vitale, "Pepoli" - S. Stefano, I.C. n.12 "Farini" - Savena, I.C. n.9 "Guercino" - Savena.

III Istanze e Obiettivi di Ricerca

La ricerca è finalizzata a fornire strumenti e metodi operativi per progettisti e operatori negli interventi di riqualificazione architettonica del patrimonio edilizio recente, mediante l'impiego di soluzioni ecocompatibili, per il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro con incremento volumetrico.

Naturalmente, la ricerca richiede necessariamente l'acquisizione di un repertorio selezionato di soluzioni tipologico-costruttive di involucro del patrimonio edilizio recente, come base di partenza per l'elaborazione di soluzioni progettuali per il recupero degli edifici scolastici appartenenti al secondo dopoguerra, in conglomerato cementizio armato, prevalentemente prefabbricati.

Volto all'elaborazione di una metodologia di progettazione di componenti di involucro "dinamico", il progetto è finalizzato alla gestione dell'intero processo progettuale - analisi, progetto, esecuzione - supportato da sistemi di rilevazione geometrica e da strumenti informatizzati CAD-CAM, connessi a macchine a controllo numerico CNC per la produzione industrializzata di soluzioni "su misura". Il mezzo di collegamento tra gli strumenti di rilievo e quelli di produzione è costituito dai software di programmazione parametrica, previsti per la modellazione di superfici in grado di adattarsi alla morfologia dei fabbricati esistenti oggetto di intervento.

Le istanze e gli obiettivi di ricerca riguardano, pertanto, la definizione di procedimenti costruttivi ecocompatibili, fondati sull'assemblaggio a secco di elementi prefabbricati leggeri, che rispettino i requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative e le esigenze di flessibilità progettuale e resa estetica.

Attraverso tutti questi obiettivi secondari, è possibile raggiungere l'obiettivo principale della ricerca che, in accordo con gli esiti finali del progetto di Tesi, consiste nell'elaborazione e promozione di un processo progettuale continuo e integrato da seguire negli interventi di riqualificazione architettonica ed efficientamento energetico. A titolo esemplificativo dell'approccio innovativo proposto, viene infine riportata la formulazione di due possibili soluzioni progettuali di involucro, svolte in linea con i paradigmi della ricerca.

In ultimo, viene presentato un progetto architettonico di recupero di una delle Scuole Secondarie di primo grado di Bologna (Scuola Media "Dozza"), mediante l'impiego di uno dei due sistemi tecnologici di involucro proposti all'interno del Capitolo III, al fine di illustrare il prodotto finale del processo progettuale integrato, proposto dal progetto di ricerca.

Le prerogative sulla validità delle soluzioni tecniche preventivate per l'incremento delle prestazioni energetiche dell'involucro riguardano primariamente i seguenti fattori:

- efficienza ed efficacia dell'intervento, in relazione agli standard energetici e all'analisi costi-benefici;

- sostenibilità degli interventi e dei materiali impiegati (recupero selettivo, riciclo e riuso dei materiali);
- compatibilità ambientale dei materiali e dei componenti;
- durabilità e ottimizzazione del ciclo di vita attraverso l'intensificazione della multifunzionalità;
- minimizzazione delle risorse attraverso la riduzione dei componenti utilizzati;
- prefabbricazione degli elementi e maggiore efficienza del processo di realizzazione dell'involucro;
- posa in opera a secco di soluzioni costruttive a cappotto esterno a costituire una seconda "pelle" da giustapporre alle pareti perimetrali dei fabbricati esistenti;
- leggerezza della struttura, in relazione alla rapidità e alla facilità di posa in opera a secco;
- ottimizzazione dei componenti stratificati dell'involucro, in relazione alla loro capacità di interagire sinergicamente per il raggiungimento del benessere abitativo interno;
- flessibilità progettuale e variabilità geometrica e dimensionale;
- figurazione e qualità estetico-architettoniche.

IV ATTIVITÀ DI RICERCA

FASE 1 - RICERCHE DI ARCHIVIO E REDAZIONE DI SCHEDE TECNICHE

In ambito di recupero di un oggetto edilizio esistente, una delle operazioni primarie consiste nella valutazione dello stato conservativo dell'edificio oggetto di recupero.

Al fine di restituire un quadro descrittivo il più possibile completo e preciso, l'acquisizione di un selezionato repertorio di finite soluzioni tipologico-costruttive di involucro del patrimonio edilizio scolastico recente consente di individuare le problematiche più rilevanti riferite alle discontinuità strutturali, compositive e materiali, quali i nodi, i punti di giunto, i disallineamenti, e tutte le disomogeneità presenti fra gli elementi costituenti l'involucro.

Uno studio attento e consapevole delle strategie di intervento sul patrimonio edilizio esistente non può, infatti, prescindere da una approfondita analisi del contesto esistente, né dalla stesura di un quadro sinottico delle tipologie strutturali-costruttive.

L'indagine dei sistemi costruttivi viene svolta sui trenta edifici scolastici delle Scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) nel Comune di Bologna, selezionati secondo i criteri che verranno esposti nei capitoli successivi. Per ciascun edificio di questo campione, viene condotta una preliminare classificazione, avvenuta tramite l'individuazione dei caratteri distintivi e delle soluzioni tecnologiche.

Per le metodologie di acquisizione dei dati, si ricorre alle varie modalità di ricerca per il riconoscimento di quegli elementi che vengono riconosciuti come rilevanti:

- ricerche archivistiche, volte a rintracciare i disegni iniziali, gli elaborati di progetto esecutivo, le immagini storiche riguardanti le fasi di cantiere depositate presso l'Archivio dell'Ufficio del genio civile di Bologna, che raccoglie i progetti risalenti al periodo compreso tra 1915 e il 1979;
- indagini bibliografiche e consultazione di libri, riviste, cataloghi, annuari e quaderni del Comune di Bologna, funzionali all'acquisizione delle conoscenze specifiche alla base delle problematiche connesse al comportamento strutturale, energetico e ambientale degli edifici esistenti e alle modalità di gestione da parte delle Pubbliche Amministrazioni;
- sopralluoghi speditivi e indagini dirette, finalizzate a contestualizzare le criticità all'interno dell'edificato esistente, affiancando alle nozioni teorico-documentali una serie di casi di studio significativi individuati.

La documentazione di archivio raccolta e il materiale fotografico acquisito durante i sopralluoghi di rilievo forniscono una valida classificazione dei trenta edifici scolastici in esame, redatta sotto forma di schede tecniche di rilievo e valutazione speditiva di requisiti e prestazioni, finalizzate all'individuazione di azioni e strategie di intervento per la riqualificazione mediante soluzioni di involucro (v. *Appendice - Schede anagrafiche e di rilievo*).

FASE 2 - RILIEVO METRICO E DESCRITTIVO DEL PATRIMONIO ESISTENTE

La metodologia di indagine del patrimonio edilizio si fonda sulla necessità di formare un organico rapporto sulla consistenza quantitativa e qualitativa del singolo edificio, che comprenda una analisi esauriente dei degradi visibili. Tale rapporto si traduce nella realizzazione di rilievi della conformazione geometrica degli oggetti edilizi entro il loro contesto microurbanistico, svolti mediante l'utilizzo degli strumenti attuali di rilievo metrico (fotogrammetria e laser scanner).

Pertanto, risulta fondamentale la redazione di un protocollo da seguire per svolgere un'approfondita analisi di carattere sistemico, grazie al quale è possibile compilare delle schede contenenti la descrizione e la valutazione dello stato conservativo di componenti edili: strutture portanti, chiusure verticali, chiusure superiori e inferiori, partizioni interne verticali e orizzontali, impianti tecnici e tutti gli altri elementi costituenti l'organismo edilizio, fino ai suoi dettagli costruttivi.

Al fine di redigere queste schede, è necessario che il rilievo in situ di ogni fabbricato venga affiancato dalla consultazione di documenti progettuali originali per accertare lo stato conoscitivo relativo a parti inaccessibili, ovviamente dopo aver verificato l'assenza di successivi lavori modificativi. Inoltre, al fine di disporre di indici convenzionali di qualità tecnologica che siano confrontabili, è necessario condurre misurazioni dirette in opera, integrate da calcoli, utili alla quantificazione delle prestazioni energetiche rilevanti (termiche, termoigrometriche, acustiche, ...).

FASE 3 - PROGETTAZIONE DI SOLUZIONI PROGETTUALI PER IL RECUPERO DELL'INVOLUCRO EDILIZIO

Successivamente alle fasi di ricerca di archivio e di rilievo metrico e descrittivo del patrimonio oggetto di studio, si può procedere con la formulazione di soluzioni progettuali per il recupero dell'involucro edilizio. Il progetto tende alla definizione di procedimenti costruttivi ecocompatibili per la realizzazione di un nuovo involucro, che rispettino i requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative e le esigenze di flessibilità progettuale e resa estetica. L'interesse è rivolto alla gestione coordinata dell'intero processo - analisi, progetto, esecuzione - grazie alle potenzialità offerte dagli attuali strumenti informatizzati CAD-CAM, direttamente collegati ai sistemi di rilievo geometrico, e connessi a macchine a controllo numerico CNC per la materializzazione e la produzione degli elementi costruttivi.

Il processo progettuale integrato del sistema innovativo di involucro si focalizza sulle tre principali tematiche di ricerca, sviluppate in sinergia e continua correlazione, che coinvolgono la morfologia del sistema, la chimica e la fisica dei materiali impiegati (in rapporto alle loro caratteristiche prestazionali, energetiche e strutturali), l'architettura tecnica e tutte le problematiche annesse, relative alla costruzione e alla messa in opera.

Lo studio della geometria, sviluppata attraverso la modellazione di superfici capaci di adattarsi alla morfologia degli edifici esistenti, presume l'impiego di software di programmazione parametrica in grado di collegarsi e gestire i dati elaborati dagli strumenti di rilievo geometrico con-

dotto precedentemente, per poi interfacciarsi con la produzione industrializzata di soluzioni “su misura” al termine dell’intero flusso di lavoro costituente il processo di progettazione.

FASE 4 - SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA E VERIFICA PRESTAZIONALE DEI PROTOTIPI

La fase finale di sperimentazione costruttiva è volta alla verifica fondamentale delle possibilità applicative del sistema innovativo di involucro elaborato dal progetto di ricerca, con particolare interesse verso la messa in luce del percorso conoscitivo e del processo adottato e dell’importanza assunta dall’attività pratica nel verificare l’appropriatezza delle considerazioni svolte in ambito teorico.

Il passaggio dalla fase ideativa a quella della sua traduzione in forma costruita avviene attraverso due momenti: il progetto e la costruzione. All’interno della Tesi vengono presentati due differenti sistemi di recupero dell’involucro edilizio, entrambi analizzati e progettati secondo il medesimo approccio, costituito da una approfondita fase teorica, indissolubilmente legata alla fase pratica finale. In particolare, la prima soluzione progettuale proposta (Sistema di involucro costituito da cubi autobloccanti *TIM*) è sperimentata durante l’esperienza costruttiva didattica svolta presso i *Grands Ateliers de l’Isle d’Abeau* (Villefontaine, Lione), mentre la seconda soluzione progettuale (Sistema di involucro a trama esagonale *G-SKinnED*) è sviluppata presso il CIRI - Edilizia e Costruzioni dell’Università di Bologna.

Il forte motivo d’interesse rappresentato da queste esperienze operative consiste non solo nel raggiungimento di una ancor più profonda comprensione dei sistemi costruttivi proposti, attraverso la sperimentazione diretta del processo di montaggio, bensì anche dalla realizzazione di modelli reali su cui poter effettuare prove di carico e verifiche prestazionali, al fine di definirne il comportamento strutturale ed energetico.

V RISULTATI

In relazione agli obiettivi secondari della ricerca, gli esiti finali attesi sono i seguenti:

- **definizione di un quadro anagrafico del patrimonio edilizio scolastico recente**, mediante la redazione di schede tecniche anagrafiche e di rilievo delle scuole secondarie di primo grado, distribuite nel territorio Comunale di Bologna, realizzate tramite il ricorso alle moderne tecniche costruttive di prefabbricazione;
- **definizione dei principali fattori di degrado** della tipologia di patrimonio edilizio analizzato, in relazione alla vulnerabilità sismica e alle prestazioni energetiche e in rapporto ai requisiti richiesti dalle attuali normative;
- **raccolta e classificazione di un repertorio selezionato di soluzioni tipologico-costruttive di involucro** per il patrimonio edilizio recente, in relazione alle tecnologie esistenti e ai materiali utilizzati nel settore edile, come base di partenza per l'elaborazione di soluzioni progettuali innovative di involucro;
- **definizione di strategie di intervento, strumenti e metodi operativi** di riferimento per il conseguimento di procedimenti costruttivi ecocompatibili, fondati sull'assemblaggio a secco di elementi prefabbricati leggeri, per la realizzazione di involucri che rispettino i requisiti prestazionali richiesti dalle normative vigenti.

In rapporto all'obiettivo principale della ricerca, i risultati finali attesi sono i seguenti:

- **elaborazione di un nuovo approccio integrato** per lo svolgimento degli interventi di recupero del costruito, che guidi progettisti e operatori durante l'**intero processo progettuale - analisi, progetto, esecuzione** - fino alla produzione di soluzioni "su misura";
- **formulazione di due soluzioni progettuali di involucro** che illustrino a titolo dimostrativo l'applicazione del processo progettuale proposto per la riqualificazione delle facciate esistenti. Attraverso la sinergica interoperabilità dei componenti, le soluzioni proposte sono in grado di trasformare la facciata da elemento statico a elemento "dinamico", capace di interagire con l'ambiente interno ed esterno, in relazione a variabilità e flessibilità delle sue prestazioni;
- **sviluppo di prototipi e verifica delle due soluzioni costruttive** di involucro proposte, ottenute dall'assemblaggio di elementi posti in opera a secco, costituiti da tre strati primari:
 1. barriera di tenuta all'acqua (*rain screen*) con resa estetica;
 2. pannello coibente/massivo costituito da materiale di riciclo ad elevata ecosostenibilità;
 3. sistema di fissaggio meccanico puntuale alla facciata esistente.
- **elaborazione di un progetto di intervento per il recupero di una delle Scuole Medie** analizzate, mediante l'impiego di uno dei due sistemi tecnologici di involucro proposti, seguito dalla relativa valutazione energetica e dall'analisi costi-benefici.

In linea con le indagini scientifiche finora condotte dall'ambito disciplinare di Architettura Tecnica (ICAR/10) del Dipartimento di Architettura di Bologna, questo progetto di ricerca nasce per contribuire allo sviluppo degli strumenti di recupero dell'edilizia recente, proponendo processi e metodi validi per la progettazione degli interventi, nell'ottica di una architettura ecosostenibile.

Inoltre, la presente Tesi di Dottorato in cotutela si inserisce perfettamente nel contesto di ricerca del *Laboratoire GSA* di Parigi, nel percorso di collaborazione pluriennale con l'Università di Bologna, volto a garantire un rapporto più stretto fra la teoria e la pratica del costruire.

Parte I - Materiali e Tecniche
Partie I - Matériaux et Techniques

I. Stato dell'arte
État de l'art

I.1 RIQUALIFICAZIONE DEL PATRIMONIO EDILIZIO PUBBLICO RECENTE

Uno dei problemi più complessi che il settore edilizio deve affrontare attualmente, sempre con maggior frequenza, riguarda il recupero degli edifici esistenti, non soltanto dal punto di vista funzionale, distributivo e architettonico, bensì anche energetico e prestazionale. In Italia, infatti, l'ambito del recupero rappresenta attualmente circa il 60% di tutto il settore edilizio, acquisendo un ruolo sempre più importante all'interno della crescita economica del paese, potendo raggiungere fino all'80% nel 2020, secondo le previsioni stilate dal CRESME.

A questo dato occorre aggiungere che la maggior parte degli edifici esistenti al giorno d'oggi ha appena raggiunto la metà del suo ciclo di vita e, pertanto, l'energia primaria inizialmente spesa per la sua realizzazione non è mai stata completamente ammortizzata. Le riflessioni in merito al risparmio di materie prime, così come la formulazione di principi che ispirino i protocolli di intervento adottati a livello nazionale per omologare le pratiche di intervento, forniscono una prima risposta alla tematica della riqualificazione del patrimonio edilizio esistente.

Attualmente, dunque, il tema dell'efficienza energetica procede simultaneamente alla richiesta di adattamento degli edifici esistenti agli standard ambientali. Questa esigenza ha dato una notevole spinta verso la ricerca di soluzioni innovative e d'avanguardia, in grado di adattarsi pienamente all'esistente, preservandone i connotati principali, ma al contempo aumentandone notevolmente le prestazioni energetiche e strutturali. In generale, le problematiche principali che la ricerca nel settore delle costruzioni deve affrontare riguardo al recupero del patrimonio edilizio recente riguardano sia i requisiti prestazionali energetici, sia l'adeguamento funzionale, estetico e architettonico.

Inoltre, occorre rilevare che il settore delle costruzioni ha un peso estremamente rilevante nell'economia del Paese, in quanto porta entrate considerevoli, a fronte di consumi ingenti. Agire su questo settore, limitando i consumi di energie non rinnovabili, migliorando le prestazioni ambientali e facendo sì che gli edifici vengano sfruttati più a lungo nel tempo, aumentandone la loro vita utile, permette di ammortizzare le spese e comporta una diminuzione degli sprechi di risorse.

Attualmente, il settore delle costruzioni contribuisce in media al 21% del PIL dei paesi dell'Unione Europea, ma al contempo costituisce anche una delle principali fonti di consumo energetico, essendone responsabile per il 40% circa (il rimanente proviene dal settore industriale per il 28% circa e dal settore dei trasporti per il 32%), con conseguenti ricadute in termini di costi energetici ed ambientali. Rispetto a questi dati, l'applicazione delle misure previste dal *PAEE - Piano di Azione Nazionale per l'Efficienza Energetica* nel 2012 ha permesso di conseguire un risparmio energetico complessivo del 30% circa in più rispetto al 2011.

In accordo con la definizione fornita dal Rapporto Brundtland, elaborato dalla Commissione Mondiale sull'Ambiente e sullo Sviluppo nel 1987, lo sviluppo si dice sostenibile se consente di "soddisfare i bisogni dell'attuale generazione senza compromettere la capacità di quelle future di

rispondere ai loro”¹. In quest’ottica, risultano sempre più emergenti le esigenze di adeguamento energetico verso il raggiungimento di un risparmio effettivamente rilevante e di un contenimento delle emissioni dannose di CO₂.

Gli avanzamenti pratici e teorici effettuati mediante gli interventi concreti volti alla sostenibilità sono riconoscibili da un lato nel campo dell’efficienza energetica, in relazione alla riduzione dei consumi e al ricorso a fonti rinnovabili di energia; dall’altro nel campo dei materiali, in termini di carico energetico, di potenziale impiegato per il riuso e riciclo, e di gestione al momento della dismissione.

Questo punto di vista ha portato a considerare il riuso e recupero degli edifici come fattore fondamentale della sostenibilità, evidenziando come un edificio con una lunga durabilità e riusabilità possa corrispondere a un’alta produttività a lungo termine delle risorse. La riqualificazione energetica degli edifici non soltanto riduce i consumi di risorse e materie prime, che nella maggior parte dei casi hanno raggiunto soltanto la metà del ciclo di vita, ma ne prolunga anche la funzionalità nel corso del tempo. Pertanto, optando per il recupero degli edifici si ricorre a una tipologia di interventi che consente di evitare gli elevati costi di energia primaria di demolizione e ricostruzione.

È chiaro, dunque, che la riqualificazione e il recupero dell’esistente incidano notevolmente all’interno del calcolo del risparmio delle risorse e rappresentino la chiave per un’edilizia sostenibile. Se a queste considerazioni si aggiunge la volontà di utilizzare materiali non derivati dal petrolio, ma naturali ed ecologici, o provenienti dal riciclo di prodotti di scarto, le potenzialità di diminuzione degli sprechi e dei consumi aumentano notevolmente. Inoltre, occorre rilevare che attraverso gli interventi di recupero si riescono ad evitare i costi di dismissione, demolizione e smaltimento delle vecchie costruzioni.

Secondo una completa visione dell’edificio come “macchina” complessa, in cui ogni parte contribuisce al comportamento prestazionale globale, ai fini della sostenibilità dell’edificio stesso, assume un ruolo determinante una progettazione di sistemi e componenti che volga particolare attenzione all’istanza ambientale che questi elementi sono chiamati a soddisfare. La progettazione di alcune parti fondamentali dell’edificio, tra cui l’involucro anzitutto, richiama l’interesse della ricerca sulla verifica di tecniche costruttive, soluzioni esecutive di posa in opera, applicazione dei materiali e modalità di funzionamento.

In particolare, tra le varie soluzioni possibili previste dagli interventi di efficientamento dell’involucro edilizio, i Sistemi di Isolamento Termico a Cappotto (*ETICS - External Thermal Insulation Composite System*) rappresentano un sistema costruttivo determinante per la riduzione del consumo energetico degli edifici, offrendo anche la possibilità di azzerarlo quasi completamente

1 Il Rapporto Brundtland, conosciuto anche come *Our Common Future*, è il documento rilasciato nel 1987 dalla Commissione Mondiale sull’Ambiente e lo Sviluppo (*WCED - World Commission on Environment and Development*) in cui viene per la prima volta introdotto il concetto di “sviluppo sostenibile”.

nei casi più virtuosi delle case passive. Se si rispettano i principi e i criteri di qualità, le esperienze pratiche dimostrano che la durata dei Sistemi *ETICS* è decisamente maggiore, almeno di cinque decenni, rispetto al periodo di prova di venticinque anni stabilito nelle attuali direttive europee. In generale, i criteri fondamentali stabiliti dalla Commissione Europea per la funzionalità di un edificio riguardano principalmente il risparmio energetico e l'isolamento termico, oltre alla sicurezza di utilizzo e gli aspetti relativi alla sua durata nel tempo.

In questo contesto si inserisce la ricerca svolta presso il Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna che, partendo dalla valutazione delle prestazioni dell'involucro edilizio, in termini di comportamento meccanico e termico, e passando dalla precisa definizione di strategie di intervento ecocompatibili e sostenibili, è volta all'elaborazione e allo studio di una soluzione tecnico-costruttiva di insieme e di dettaglio.

I.1.1 ASPETTI NORMATIVI

Nella seconda metà del XX secolo, successivamente alla fase di ricostruzione postbellica e sviluppo urbano dovuto al boom economico degli anni Sessanta, il settore edilizio in Italia si dedica contemporaneamente alla nuova costruzione e al restauro e recupero del patrimonio edilizio esistente. Fino a quel momento, invece, il patrimonio dei beni culturali era stato regolato dalla **Legge 1 giugno 1939, n. 1089 - Tutela delle cose d'interesse Artistico o Storico**, e dalla **Legge 29 giugno 1939, n. 1497 - Protezione delle bellezze naturali, o avente interesse architettonico, archeologico e storico-artistico**.

Verso la fine degli anni Sessanta si assiste invece a un rinnovato interesse per i centri storici nel loro complesso, che porta a un ampio dibattito sul tema del Recupero, testimoniato in tal senso dalla **Carta di Gubbio del 1970**, in cui si afferma che “oggetto del recupero è tutto il patrimonio edilizio esistente”. La dichiarazione di Gubbio segna l'inizio di un dibattito sempre più acceso sulla necessità di elaborare strumenti e procedure adeguate agli interventi sul patrimonio edilizio esistente.

Un rilevante impulso in questo senso è segnato dall'approvazione della **Legge 6 dicembre 1974, n. 394 - Legge Quadro sulle Aree Protette**, a dimostrazione del recepimento a livello normativo delle avanguardie culturali internazionali che identificano gli strumenti per uno sviluppo sostenibile nei principi della conservazione, valorizzazione e ricapitalizzazione delle risorse.

La differenziazione tra Restauro e Recupero risale al momento in cui la **Legge 5 agosto 1978, n. 457 - Norme per l'edilizia residenziale** consente di intervenire sul patrimonio edilizio storico, senza sottostare ai vincoli posti dalla Legge n. 1089 del 1939. Attraverso tale modifica legislativa, si attua una distinzione netta tra le diverse categorie di intervento², differenziando tra gli interventi

2 “Gli interventi di recupero del patrimonio edilizio esistente sono così definiti:

a) interventi di *manutenzione ordinaria*, quelli che riguardano le opere di riparazione, rinnovamento e sostituzione delle finiture degli edifici e quelle necessarie ad integrare o mantenere in efficienza gli impianti tecnologici esistenti;

b) interventi di *manutenzione straordinaria*, le opere e le modifiche necessarie per rinnovare e sostituire parti anche strutturali degli edifici, nonché per realizzare ed integrare i servizi igienico-sanitari e tecnologici, sempre che non alterino i volumi e le superfici delle singole unità immobiliari e non comportino modifiche delle destinazioni di uso;

c) interventi di *restauro e risanamento conservativo*, quelli rivolti a conservare l'organismo edilizio e ad assicurarne la funzionalità mediante un insieme sistematico di opere che, nel rispetto degli elementi tipologici, formali e strutturali dell'organismo stesso, ne consentano destinazioni d'uso con essi compatibili. Tali interventi comprendono il consolidamento, il ripristino e il rinnovo degli elementi costitutivi dell'edificio, l'inserimento degli elementi accessori e degli impianti richiesti dalle esigenze dell'uso, l'eliminazione degli elementi estranei all'organismo edilizio;

d) interventi di *ristrutturazione edilizia*, quelli rivolti a trasformare gli organismi edilizi mediante un insieme sistematico di opere che possono portare ad un organismo edilizio in tutto o in parte diverso dal precedente. Tali interventi comprendono il ripristino o la sostituzione di alcuni elementi costitutivi dell'edificio, la eliminazione, la modifica e l'inserimento di nuovi elementi ed impianti;

e) interventi di *ristrutturazione urbanistica*, quelli rivolti a sostituire l'esistente tessuto urbanistico edilizio con altro diverso, mediante un insieme sistematico di interventi edilizi anche con la modificazione del disegno dei lotti, degli isolati e della rete stradale. (...)” (Legge 5 agosto 1978, n.457 - *Norme per l'edilizia residenziale*, Art. 31. Definizione degli interventi (implicitamente abrogato dall'articolo 3 del D.P.R. 6 giugno 2001, n.380)).

volti alla tutela degli oggetti monumentali e quelli riservati alla riqualificazione del costruito storico.

Nella sostanza, però, questa distinzione formale svanisce durante il momento della applicazione dei protocolli tecnici di intervento, venendo celata dall'omogeneità dell'approccio teorico e operativo con cui si affrontano uniformemente questo tipo di problematiche. Al di là di questa differenziazione, infatti, l'atteggiamento culturale e operativo da assumere per affrontare le pratiche di intervento, indistintamente negli ambiti di restauro, recupero, riuso, riabilitazione, consolidamento, dovrebbe rivolgersi al concetto di conservazione attiva, che fonda la scelta delle tecniche di intervento sul principio teorico della pratica manutentiva. Il concetto di manutenzione non deve essere inteso in opposizione con quello di conservazione, bensì in continuità, in quanto si può sostenere che non vi sia conservazione senza manutenzione³. La differenziazione tra gli specifici ambiti di interesse scientifico è infine determinata dalle ulteriori sfumature che consentono di declinare le azioni in interventi architettonico-monumentali (restauro), edilizi e urbani (recupero e riuso), di conservazione e messa in sicurezza (riabilitazione e consolidamento).

In sintesi, gli interventi sul costruito si distinguono tra quelli appartenenti all'ambito del Restauro e del Recupero, in funzione della classificazione dell'oggetto di intervento. In particolare, il Restauro si occupa di edifici tutelati in accordo con il **D.lgs. 29 ottobre 1999, n. 490 - Nuove disposizioni in materia di beni culturali e ambientali**, mentre il Recupero riguarda gli interventi sul patrimonio edilizio esistente non tutelato, in accordo con la Legge n. 457 del 1978 e con il **D.P.R. 6 giugno 2001 - Testo Unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia**.

Gli studi sull'approccio del Recupero vengono approfonditi anche attraverso un'attività normativa volta a definire e sistematizzare gli strumenti per la conoscenza della gestione in itinere dei beni architettonici (**UNI 7867-2: 1978 - Edilizia. Terminologia per requisite prestazioni. Specificazione di prestazione, qualità e affidabilità**, sostituita da **UNI 10838: 1999 - Edilizia. Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio e alla qualità edilizia**).

Il tema della tutela e valorizzazione del patrimonio architettonico e paesaggistico nazionale si afferma come obiettivo prioritario delle strategie di sviluppo sostenibile già con la **Carta di Granada del 1985**, in cui si afferma che: "il patrimonio architettonico costituisce una espressione irripetibile della ricchezza della diversità del patrimonio culturale d'Europa, una testimonianza inestimabile del nostro passato e un bene comune a tutti gli europei; è importante trasmettere un insieme di riferimenti culturali alle generazioni future, migliorare la qualità della vita urbana e rurale

³ "Non vi è conservazione senza manutenzione, e questo rapporto stretto rende i due termini, in alcuni casi, intercambiabili. Tuttavia spesso si tende a richiamare l'attenzione, più sull'obiettivo teorico - la conservazione - che sull'azione processuale reale - la manutenzione - (...) Il Recupero è una parola degna di grande attenzione poiché allude, come la manutenzione, ad un'azione processuale, che vede come protagonista il bisogno umano e il senso, storico e attuale, degli oggetti da recuperare. Ancora una volta, pone al centro il rapporto tra gli uomini e le cose. Cioè la storia. Recupero, infatti, richiama etimologicamente il ri-prendere - in esame, in carico - e, quindi, il com-prendere di nuovo." (Manieri Elia M.)

e favorire contemporaneamente lo sviluppo economico sociale culturale; è importante accordarsi sugli orientamenti essenziali per una politica comune che garantisca la salvaguardia e la valorizzazione del patrimonio architettonico”.

Il principio della salvaguardia dell'identità nazionale è nuovamente affermato nel **Trattato di Maastricht del 1992** che, istituendo il principio di sussidiarietà tra gli Stati membri, legittima la necessità di raggiungere una sempre maggiore consapevolezza dell'identità del patrimonio locale.

Tale assunto culturale matura attraverso la **Dichiarazione di Istanbul del 1996**, sottoscritta dai capi di Stato e di governo riuniti a Istanbul per la Seconda Conferenza dell'ONU sugli insediamenti umani. I temi fondamentali trattati in questa occasione vengono approfonditi nell'*Agenda Habitat II*, con cui viene promossa la riqualificazione e la manutenzione degli edifici, dei monumenti, degli spazi pubblici e dei paesaggi di particolare valore storico, culturale, architettonico, naturale, religioso-spirituale.

Nel corso dei secoli, l'industrializzazione e l'uso sempre maggiore di combustibili fossili ha provocato progressivi cambiamenti della composizione atmosferica, e dunque del clima, aggravati da un sempre maggiore tasso di inquinamento ambientale. Nel XX secolo, l'aggravarsi di queste problematiche rende sempre più forte l'esigenza di promuovere una sensibilizzazione verso interventi di recupero basati sull'adozione di soluzioni capaci di favorire una crescita sostenibile.

L'Unione Europea ha riservato particolare importanza al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici esistenti, introducendo, proprio per questo proposito, la certificazione energetica attraverso la **Direttiva Europea 2002/91/CE** sul rendimento energetico nell'edilizia. Nelle linee guida tracciate dalla direttiva si delinea in più passaggi un orientamento volto a incoraggiare una progettazione consapevole delle caratteristiche climatiche del luogo e attenta nei confronti dei fattori incidenti sul comportamento energetico degli edifici.

In Italia, tale Direttiva viene recepita dal **D.lgs 27 luglio 2005, n. 187 - Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia d'uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia**, ma soprattutto dal **D.lgs 19 agosto 2005, n. 192 - Attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia**. Quest'ultimo decreto introduce requisiti molto restrittivi sull'isolamento termico degli edifici, sui generatori di calore e sul fabbisogno di energia per la climatizzazione invernale, ma affronta poco il problema del benessere estivo. Tale decreto ha effettivamente portato a un ribaltamento del ruolo dell'involucro edilizio come elemento fondamentale per l'efficientamento delle prestazioni energetiche degli edifici e per il controllo dei loro consumi energetici.

Il **D.lgs. 30 maggio 2008, n. 115 - Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE** stabilisce un quadro di misure volte al miglioramento dell'efficienza degli usi finali dell'energia

sotto il profilo di costi e benefici.

Nel 2009 viene pubblicata la **Direttiva 2009/28/CE** sulla promozione dell'uso di energia ricavata da fonti rinnovabili, seguita nel 2010 dalla **Direttiva 2010/31/CE** del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia che aggiorna quella del 2002. Quest'ultima rientra tra i provvedimenti che l'Unione Europea ha definito per raggiungere gli obiettivi del **Piano di Azione 20-20-20**, che prevede di raggiungere entro il 2020 i seguenti obiettivi: la riduzione del 20% delle emissioni di CO₂, l'aumento fino al 20% della quota di energia da fonti rinnovabili, il miglioramento del 20% dell'efficienza energetica di tutti i settori. In particolare, la principale novità della nuova direttiva riguarda l'obbligo di costruire nuovi edifici solo ad "energia quasi zero" a partire dal 2020.

La Direttiva 2010/31/UE viene recepita dallo Stato Italiano con il **D.Lgs 4 giugno 2013, n. 63**, il quale non comporta modifiche immediate fino all'approvazione dei decreti attuativi. Il nuovo provvedimento italiano stabilisce che, a partire dal 31 dicembre 2018, gli edifici di nuova costruzione utilizzati da Pubbliche Amministrazioni e di proprietà di queste ultime devono essere progettati e realizzati quali edifici "a energia quasi zero". Per questo, alcune Regioni si sono dotate di una propria disciplina per il contenimento dei consumi e per la certificazione energetica degli edifici. Tra queste compare anche la Regione Emilia Romagna, che ha emanato la **Delibera di Assemblea Legislativa 4 marzo 2008, n. 156**, le cui disposizioni sono entrate in vigore dall'1 luglio 2008.

Ad oggi, il processo di armonizzazione delle norme europee non si è ancora concluso. Per questo motivo, a integrazione della Direttiva Europea sui prodotti da costruzione (*CPD - Construction Products Directive*), si applica il diritto del singolo paese in materia di edilizia per l'applicazione dei sei requisiti essenziali (*ER - Essential Requirements*): resistenza meccanica e stabilità, sicurezza in caso di incendio, sicurezza durante l'uso, protezione contro il rumore, risparmio energetico e dispersione termica, uso sostenibile delle risorse naturali.

In particolare, fra le materiali edili specificamente volti al miglioramento prestazionale energetico degli edifici esistenti nell'ottica di sostenibilità ambientale, acquistano un ruolo rilevante i sistemi a cappotto *ETICS* (*External Thermal Insulation Composite System*). Per questa categoria di sistemi di isolamento dell'involucro, la Commissione Europea ha affidato all'*EOTA* (*European Organization for Technical Approval*) il compito di redigere le linee guida per l'approvazione dei sistemi *ETICS* a livello europeo: così nasce la **Linea Guida Tecnica - ETAG 004** (*European Technical Approval Guideline*) per Sistemi *ETICS* su supporti in muratura e calcestruzzo. Per utilizzi diversi da questo, vengono elaborate singolarmente dai membri dell'*EOTA* linee guida specifiche, denominate *CUAP* (*Common Understanding of Assessment Procedure*).

Di seguito si riportano le normative vigenti a livello internazionale che riguardano, in particolare, i materiali isolanti più comunemente impiegati per il Sistema di Isolamento Termico a

Cappotto, di tipo EPS (polistirene espanso sinterizzato) e MW (lane minerali):

- ETAG 004 - Linee guida tecniche europee per Sistemi Isolanti a Cappotto per esterni con intonaco;
- ETAG 014 - Linee guida tecniche europee per tasselli in materiale plastico per sistemi isolanti a cappotto;
- UNI EN 13162: 2009 Isolanti termici per edilizia - Prodotti di lana minerale (MW) ottenuti in fabbrica - Specificazione;
- UNI EN 13163: 2001 Isolanti termici per edilizia - Prodotti di polistirene espanso (EPS) ottenuti in fabbrica – Specificazione;
- UNI EN 13494: 2003 Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze a trazione dell'adesivo e del rivestimento di base al materiale isolante;
- UNI EN 13495: 2003 Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze allo strappo dei sistemi di isolamento per l'esterno (cappotti) (prove del blocco di schiuma espanso);
- UNI EN 13496: 2003 Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle proprietà meccaniche delle reti in fibra di vetro;
- UNI EN 13497: 2003 Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze all'impatto dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti);
- UNI EN 13498: 2003 Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze alla penetrazione dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti);
- UNI EN 13499: 2005 Isolanti termici per edilizia – Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di polistirene espanso – Specifiche;
- UNI EN 13500: 2005 Isolanti termici per edilizia – Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di lana minerale – Specifiche.

Inoltre, è importante rilevare che per i pannelli isolanti è sempre necessaria la marcatura CE per l'immissione dei prodotti sul mercato edile, la quale viene applicata in base alle norme di prodotto: ad esempio, per i sistemi in EPS (polistirene espanso sinterizzato) ci si riferisce alla **UNI EN 13163**, mentre per quelli in MW (lana minerale) alla **UNI EN 13162**.

Occorre precisare che la marcatura CE, pur rappresentando la “carta d'identità” del prodotto, non fissa i requisiti minimi prestazionali specifici per l'applicazione del Sistema a Cappotto e, di conseguenza, non è sufficiente per attestare l'idoneità dei pannelli isolanti a tale applicazione. Pertanto, occorre tenere presente che l'azienda produttrice dell'isolante deve attestare l'idoneità del proprio prodotto per l'utilizzo in Sistemi ETICS, fornendo una adeguata documentazione tecnica al produttore del sistema.

In particolare, il produttore deve fornire l'attestazione di un ente esterno che certifichi, per i propri pannelli isolanti, il raggiungimento dei valori fissati come requisiti minimi dalla linea guida

europea relativa ai Sistemi a Cappotto (ETAG 004).

In aggiunta alle prescrizioni espresse dall'ETAG 004, eventuali norme nazionali possono prescrivere ulteriori caratteristiche e requisiti prestazionali. Mancando in Italia ulteriori riferimenti, si ritiene opportuno considerare le indicazioni delle norme **UNI EN 13499:2005** (per il polistirene espanso - EPS) e **UNI EN 13500:2005** (per la lana di roccia - MW), che esplicitano i requisiti prestazionali minimi per l'utilizzo dei pannelli isolanti nei Sistemi *ETICS*.

Infine, per essere idoneo all'utilizzo nei Sistemi *ETICS*, oltre a dover presentare le necessarie certificazioni e un valore di conduttività termica λ adeguato, un pannello isolante deve avere caratteristiche tecniche ben definite e verificate in un certificato di prova ETA, quali ad esempio la resistenza a trazione e a taglio, o ancora l'assorbimento d'acqua.

I.1.2 STATO ATTUALE

Durante gli anni compresi fra il dopoguerra e la fine degli anni Sessanta, la necessità di risolvere la carenza di strutture adeguate per le attività residenziali, di servizio e di istruzione ha portato a fornire risposte immediate provenienti da una situazione di urgenza: la ricerca di soluzioni ottimali, in termini temporali ed economici, spesso, si è però inevitabilmente realizzata a discapito della qualità architettonica e urbanistica. È dunque necessario oggi riprendere i lavori appartenenti a quest'epoca, rivedendone i caratteri tipologico-costruttivi, al fine di restituire loro la qualità architettonica che talvolta non hanno mai posseduto.

Secondo i dati diffusi da CRESME (*Centro Ricerche Economiche Sociali di Mercato per l'Edilizia e il Territorio*) 2012, in Italia vi sono almeno due milioni e mezzo di immobili che necessitano di interventi significativi di manutenzione ordinaria e straordinaria, tra cui interventi di consolidamento, restauro ed efficientamento energetico. Infatti, il 60% del patrimonio edilizio esistente italiano, equivalente a oltre sette milioni di edifici, è stato realizzato più di quaranta anni fa. Questa percentuale cresce fino al 70% per le città capoluogo e fino al 76% per le grandi città metropolitane e, secondo i dati rilevati ISTAT e CRESME, si prevede che nei prossimi dieci anni possa arrivare fino all'85%.

Questi dati legati alla prevalente fascia di mercato rappresentata dal patrimonio edilizio recente sono confermati da altri dati molto rilevanti in merito al peso delle ristrutturazioni edilizie che, all'interno dell'intero fatturato delle imprese edili italiane, è passato dal 25% stimato nel 2008 al 40% del 2013. Questo fenomeno è confermato ulteriormente da uno studio del Centro Studi CNA-CRESME pubblicato nel maggio 2013, in cui si evidenzia come la spesa degli interventi di recupero abbia raggiunto quasi il 62% dell'intero fatturato dell'edilizia. Si può dire quindi che, durante gli anni intercorsi dal 2006 ad oggi, il peso della riqualificazione è cresciuto di oltre 6 punti percentuali, contribuendo ad attenuare la drastica riduzione di 44 punti percentuali del settore edile in ambito di nuove costruzioni.

Questa tendenza positiva per la promozione di interventi di rinnovo si è diffusa sicuramente anche grazie ai riferimenti normativi e ai provvedimenti di defiscalizzazione sul recupero edilizio e sull'efficientamento energetico. Infatti, i dati rilevano che nel 2012, grazie agli incentivi alla ristrutturazione e al risparmio energetico, si è raggiunta una duplice azione positiva, sia sull'andamento del mercato, sia sui conti dello Stato italiano che ha registrato un saldo economico positivo di 2,3 miliardi di euro e un saldo finanziario positivo al 2012 di 17,8 miliardi di euro.

Si può affermare quindi definitivamente il ruolo significativo svolto dalla riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente che, a prescindere dalla valenza architettonica, storica e artistica dei fabbricati, rappresenta comunque una testimonianza dell'identità culturale di un'epoca, degna di essere rispettata e valorizzata.

In quest'ottica, il recupero edilizio si pone in piena sintonia con i principi di sostenibilità ambientale ed economica, enunciati precedentemente, al centro delle attuali prospettive normative e delle pratiche di intervento. Sulla base dei dati rilevati in merito alla consistenza del patrimonio edilizio esistente, e in particolare di quelli relativi alla grande porzione di edilizia pubblica, si comprende come la riqualificazione urbana e architettonica possa assumere un valore fondamentale per un approccio sostenibile, in contrapposizione agli interventi di demolizione e ricostruzione⁴.

Le considerazioni svolte all'interno della Tesi in merito all'edilizia scolastica recente possono essere estese all'intero patrimonio edilizio realizzato dopo il secondo dopoguerra. Non soltanto le scuole, ma anche le strutture pubbliche dedicate ad ospitare case popolari, ospedali, tribunali, o altre funzioni di carattere collettivo, presentano attualmente uno stato conservativo e prestazionale molto scadente. Si tratta infatti di organismi edilizi progettati in un'epoca non governata dalle normative volte al rispetto dei requisiti odierni di comfort abitativo, efficienza energetica e sostenibilità ambientale. Questi fabbricati oggi presentano molteplici problematiche, legate alla sicurezza statica e alla vulnerabilità sismica, alle condizioni di fruizione e sicurezza, alle qualità estetiche e architettoniche, al comfort ambientale interno, e al consumo di risorse energetiche.

Valutando il fenomeno sulla base di dati statistici, allo stato attuale, si calcola che più del 50% del patrimonio edilizio europeo riporta consumi energetici oltre i 150 kWh/m².anno. In particolare, in Italia, il patrimonio edilizio si trova in uno stato di elevata obsolescenza, poiché il 30% degli edifici è stato costruito prima del 1945 e il 66% tra il 1945 e il 2000. Se si considera che più della metà degli edifici è stata comunque realizzata prima della Legge 30 aprile 1976, n.373 - *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici*, appare chiara la necessità di intervenire con una riqualificazione sistematica e mirata alla riduzione dei consumi.

L'elevato consumo energetico da parte dell'uomo rappresenta una delle principali cause dell'attuale crisi ambientale che sta vivendo il pianeta, fortemente caratterizzata dal ricorso indistinto all'ausilio della produzione artificiale di energia per il raggiungimento e il mantenimento del benessere interno ricercato.

Nel mondo occidentale, i comuni edifici destinati ad uso residenziale riportano consumi energetici che, in media, si attestano dai 150 ai 300 kWh/m².anno, mentre quelli destinati al settore terziario arrivano a necessitare di consumi energetici che variano tra i 300 e i 600 kWh/m².anno, comprendendo riscaldamento, raffrescamento e illuminazione. Questi dati assumono un significato ben preciso se confrontati con la soglia di accettabilità dei consumi energetici, valutata secondo

4 In merito al potenziale architettonico degli edifici esistenti, all'interno del più ampio patrimonio edilizio esistente europeo, si pensi ad esempio all'architettura dei *grands ensembles* francesi, dallo stato conservativo attuale altamente degradato: essi possiedono un elevato potenziale, il cui valore risiede "nella dotazione di grandi spazi, di grandi superfici vetrate, di grandi altezze, nella possibilità di ampie visuali, negli spazi interstiziali, nella dilatazione degli spazi, nell'economia". (Druot F., Lacaton A. & Vassal J.-P., *Plus*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.).

un'ottica sostenibile, pari a una quantità dieci volte più piccola per entrambe le destinazioni d'uso⁵.

Sulla base dell'analisi dello stato di fatto del patrimonio edilizio attuale e delle riflessioni svolte in linea con il quadro normativo, che negli anni ha preso forma a livello europeo, anche la legislazione italiana ha assunto una posizione ben precisa in merito al controllo dei consumi e delle prestazioni energetiche degli edifici. Infatti, all'interno del rapporto tra l'elemento costruttivo di involucro e l'ambiente circostante, assume un ruolo sempre più importante l'uso di fonti energetiche tradizionali e innovative, impiegate secondo un approccio volto al raggiungimento di un efficientamento energetico mediante metodi e strumenti a basso impatto ambientale.

Negli ultimi due decenni, quindi, l'Italia ha formulato una serie di decreti legislativi finalizzati a imporre limiti precisi ai consumi energetici, e a fornire linee guida in continuità con le intese del Protocollo di Kyoto del 1997 e con la successiva Direttiva 2002/91/CE - *Rendimento energetico degli edifici in relazione alle condizioni locali e climatiche esterne*. Tramite queste direttive, anche il paese italiano si è uniformato al quadro normativo europeo, promuovendo l'uso di energie alternative non tradizionali, considerate sostenibili ed ecocompatibili, in quanto rinnovabili o non esauribili.

Mediante la promozione e la diffusione di tale atteggiamento culturale verso le pratiche progettuali nel settore edile, le politiche italiane hanno sollecitato la predilezione per le tecnologie innovative basate sull'impiego di risorse energetiche più facilmente accessibili, rispetto ad altre tecnologie tradizionali che attualmente avrebbero un impatto ambientale più oneroso. Parallelamente alla promozione dell'impiego di queste tecnologie, si sollecita la loro integrazione e combinazione con strategie capaci di interagire attivamente e passivamente con i fattori bioclimatici, quali il soleggiamento, la ventilazione e l'illuminazione naturale.

L'interazione sinergica tra l'ambiente interno all'edificio e il contesto climatico circostante avviene mediante l'involucro edilizio. In questo senso, si può affermare che, tra gli elementi cardine per un'architettura ecoefficiente e consapevole dal punto di vista ambientale, l'involucro svolge uno dei ruoli primari, inteso come elemento architettonico capace di dialogare attivamente con i fattori microclimatici di esposizione alla radiazione solare, in termini di prestazioni termiche e di fattori di illuminazione e ventilazione naturale.

Dalla analisi dello stato attuale conservativo e prestazionale del patrimonio edilizio esistente, si nota come la maggior parte di esso sia stato realizzato secondo progetti svolti all'interno di un quadro di strategie e metodi esecutivi non sufficientemente controllati. A partire dalla valutazione delle carenze prestazionali, quindi, è possibile trarre una serie di principi guida che consentano di condurre una progettazione degli edifici, e in particolare dell'involucro edilizio, secondo un nuovo approccio attento agli aspetti legati alla vita utile degli elementi architettonici, all'impatto ambien-

⁵ Tucci F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, ALINEA Editrice, Firenze 2006.

tale e alla riduzione dei consumi energetici ed economici.

Uno strumento guida molto importante in questo ambito, di carattere teorico e metodologico-strumentale, è fornito dalla *Carta Solare per l'Energia Solare in Architettura e Pianificazione urbana* (a cura di Herzog T.), basata sui testi di contributo redatti da trenta personalità provenienti da tutto il mondo, in occasione del III Congresso Internazionale sull'Energia Solare, tenutosi a Berlino⁶.

6 "Le risorse naturali disponibili in un certo luogo, specialmente sole, vento e geotermia, potrebbero essere utilizzate per la climatizzazione degli edifici per riflettersi nella stessa concezione del programma e della forma. (...) Gli edifici e gli spazi urbani aperti dovrebbero essere progettati in modo tale che una quantità minima di energia basti loro per l'illuminazione e serva in termini di calore utile per l'acqua calda e per scopi di riscaldamento, refrigerazione, ventilazione e generazione dell'elettricità dalla luce naturale. Le soluzioni per soddisfare tutte le esigenze rimanenti andrebbero scelte tra quelle che tengono conto dei criteri di un bilancio energetico globale sostenibile e che si conformano con il più innovativo livello di conoscenza tecnica nell'impiego di forme di energia compatibili con l'ambiente. (...) L'impiego di materiali, forme di costruzione, produzione tecnologica, trasporto, assemblaggio e smontaggio delle componenti di un edificio e del suo involucro devono pertanto tener conto del loro contenuto energetico e del loro ciclo di vita". (Herzog T., *Solar energy in Architecture and Urban Planning*, Prestel, Monaco, 1996.)

I.1.3 CRITERI DI INTERVENTO

Il settore delle costruzioni consuma circa il 60% delle risorse estratte dalla terra, e circa il 30% dei rifiuti prodotti in Italia deriva da opere di demolizione e da lavori di ristrutturazione edilizia. A partire da questi dati, la necessità di trovare strumenti di ausilio per incentivare la diffusione del riuso e del riciclo trova conferma nelle disposizioni della Legge Merloni n. 109/94 e nel relativo regolamento di attuazione (art. 15, D.P.R. n.554/1999). In esso si dispone che la progettazione debba essere uniformata “a principi di minimizzazione dell’impiego di risorse materiali non rinnovabili e di massimo utilizzo delle risorse naturali impegnate nell’intervento e di massima manutenibilità, durabilità dei materiali e dei componenti, sostituibilità degli elementi, compatibilità dei materiali ed agevole controllabilità delle prestazioni dell’intervento nel tempo”.

Una nuova cultura della sostenibilità deve prevedere l’uso di materiali ecocompatibili che, impiegati all’interno di soluzioni a cappotto per gli edifici del patrimonio edilizio recente, presentino alcune qualità fondamentali: la durabilità e la capacità di invecchiare bene; la leggerezza, legata non soltanto alle capacità resistenti dell’involucro bensì anche alla maneggiabilità e alla velocità di posa in opera a secco; la minimizzazione del consumo di energia in fase di loro ottenimento, lavorazione, posa in opera, riciclo o dismissione; la flessibilità e la reversibilità nel tempo in base alle esigenze dell’utenza.

Uno degli aspetti imprescindibili del progetto di ricerca consiste nella volontà di sviluppare un sistema integrato che consenta di realizzare involucri in grado di adattarsi alla morfologia dell’involucro esistente, permettendo conseguentemente di eseguire soluzioni “su misura”. Le istanze e gli obiettivi della ricerca riguardano proprio la definizione di procedimenti costruttivi ecocompatibili fondati sull’assemblaggio a secco di elementi prefabbricati leggeri, che rispettino tanto i requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative, quanto le esigenze di flessibilità progettuale e resa estetica finalizzate a garantire esiti architettonici soddisfacenti.

Una analisi approfondita del patrimonio edilizio recente realizzato durante gli anni Sessanta e Ottanta, prevalentemente in conglomerato cementizio armato, induce al riconoscimento delle capacità strutturali, geografiche e spaziali di questi edifici: esse rappresentano un valido punto di partenza al fine di operare nell’ambito del loro recupero e della conservazione del loro scheletro strutturale.

Qualsiasi struttura esistente, legata a un preciso contesto storico-sociale e tecnico-costruttivo, può costituire una buona occasione di partenza per l’attuazione di strategie di riorganizzazione, seppur lievi ma radicali, provenienti direttamente dall’applicazione di sistemi tecnologici innovativi per la riabilitazione del patrimonio esistente. Il valore di questo legame con l’esistente deve essere riconosciuto e rispettato, attraverso l’attuazione di interventi coerenti che siano in grado di mantenerlo nel tempo.

Qualsiasi situazione urbana, così come qualsiasi alloggio esistente, presenta infatti le potenzialità per assumere la natura di spazio peculiare, distinto dagli altri economicamente percorribili. Il patrimonio edilizio esistente rappresenta così un valido punto di partenza per lo sviluppo di nuove soluzioni progettuali, da esplorare nelle loro molteplici espressioni formali e morfologiche.

Oltre alle riflessioni legate alla storia architettonico-costruttiva e sociale, è importante valutare l'ipotesi di rinunciare alla loro demolizione, in quanto altri fattori comportano ulteriori valide motivazioni a favore di questo tipo di interventi:

- gli elevati costi di demolizione e ricostruzione che, talvolta, possono superare notevolmente l'ammontare dei costi previsti per un intervento di recupero (motivo per il quale è sempre necessario svolgere una attenta analisi costi-benefici prima di procedere con gli interventi, al fine di ottimizzare l'impiego di risorse economiche e materiali, nel rispetto di principi di ecosostenibilità);
- la carenza di altri edifici che possano ospitare, seppur temporaneamente, le stesse persone e le stesse funzioni, comportando importanti problematiche di carattere gestionale e sociale;
- la perdita dell'eventuale valida occasione di recuperare una struttura esistente, per ottenere una struttura notevolmente migliorata, a livello architettonico e prestazionale, qualora la struttura di partenza non sia eccessivamente degradata⁷.

In un'ottica ecosostenibile, è dunque importante interrogarsi preliminarmente su quale livello di degrado della struttura esistente possa compromettere le sue prestazioni e le sue capacità di garantire il naturale svolgimento della destinazione d'uso per le quali essa è stata progettata. Qualsiasi intervento di recupero permette di conferire uno sguardo nuovo, a posteriori, a ciò che già esiste e che si è sviluppato naturalmente nel corso degli anni, sotto le intenzioni progettuali di architetti e ingegneri e, al contempo, spontaneamente sotto l'azione degli abitanti.

Ispirandosi ai principi di sostenibilità e durabilità del settore delle costruzioni, attualmente imprescindibili, si avverte dunque un grande potenziale nella possibilità di recuperare gli edifici degradati, qualora una accurata analisi dei costi-benefici riporti esiti sfavorevoli nei confronti di una pratica alternativa di demolizione, e successiva ricostruzione di un fabbricato⁸.

7 "On se va beaucoup plus loin à partir de «quelque chose» plutôt que si l'on repart de zéro, en démolissant par exemple. Une pratique basée sur la récupération d'une valeur que l'on utilise à un moment donné et que l'on peut pousser plus loin que si l'on revenait à un stade initial. Cette forme d'intelligence qui s'organise à «partir de quelque chose» est plus riche que la table rase. Elle me paraît très intéressante à mettre en place pour idéaliser l'habitat." (...) "Il semblerait qu'apparaisse aujourd'hui une opportunité fantastique pour exprimer cet idéal car la matière construite est déjà là, l'engagement politique et financier aussi." (Druot F., Lacaton A. & Vassal J.-P., *Plus*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.)

8 "Cela pose aussi directement la question de la modernité. Pour revenir à l'Afrique, je n'ai jamais rencontré «d'attitudes» aussi «modernes» dans les façons de faire et de concevoir que là-bas. Est ce que cela à avoir avec le fait de situations difficiles, de situations contraintes? Oui, certainement. Mais ce qui est clair, c'est que nous traversons actuellement une époque où la façon de faire l'architecture, et de faire de l'urbanisme change radicalement. Et c'est d'autant plus difficile car l'on continue d'apprendre «le projet» comme on l'apprenait avant. A enseigner selon le principe de la feuille blanche. On ne part jamais d'un préalable si ce n'est dans des logiques patrimoniales. Le préalable

Il criterio di intervento perseguito consiste nella rinuncia a demolire, sottrarre o sostituire parti dell'edificio, per optare a favore di operazioni di aggiunta, trasformazione e utilizzo della stessa struttura originaria. Come sottolineano gli architetti Lacaton & Vassal, figure professionali francesi di riferimento per le pratiche di recupero dell'esistente, questo tipo di interventi "si fonda sulla precisione, la delicatezza, la gentilezza, l'attenzione: attenzione verso le persone, verso gli usi, le costruzioni, gli alberi, verso le strade e i prati, verso tutto l'esistente"⁹.

Dalle recenti linee di ricerca e dagli interventi sperimentali francesi, e in generale europei, si evince che, spesso, recuperare risulta più economico rispetto a demolire e ricostruire. Alla pratica di demolizione di edifici e interi quartieri del passato, emblema di "errori architettonici, tecnologici e sociali"¹⁰, si contrappone così la possibilità di attuare interventi di mantenimento e conservazione in grado di cogliere l'opportunità per integrare tutte le dimensioni della riqualificazione.

Il progetto di ricerca sviluppato durante la Scuola di Dottorato è rivolto alla riqualificazione di dodici edifici scolastici, scelti all'interno del patrimonio edilizio scolastico del Comune di Bologna, selezionati per la tecnica costruttiva prevalentemente prefabbricata con la quale sono stati realizzati. A partire da una approfondita analisi delle diverse particolarità costruttive e tecnologiche, architettoniche e funzionali degli edifici scelti, la ricerca è volta all'elaborazione di soluzioni progettuali che siano riproducibili e adattabili ad altri edifici e contesti analoghi e confrontabili con quelli di progetto per patologie edilizie, tecnologie costruttive, elevati consumi energetici, degrado urbano e disagio sociale.

L'obiettivo consiste nell'elaborazione di un processo da adottare nel campo del recupero degli edifici recenti, in grado di rispondere, attraverso interventi di adeguamento tecnologico, funzionale ed architettonico, all'eredità problematica che è stata lasciata dagli interventi realizzati durante gli anni Sessanta e Ottanta, prestando attenzione tanto alle problematiche costruttive e strutturali, quanto ai temi ambientali.

aujourd'hui c'est une ville complexe, riche, difficile et c'est avec cette matière là qu'il faut travailler. Je pense que la comparaison avec la musique urbaine est là aussi. On n'est pas obligé de revenir à la source pour faire de la création. On peut combiner des choses entre elles, les mettre cote à cote, en vis à vis, etc. Mais en architecture, on va rarement jusqu'au bout. Quand on doit transformer une usine en logements, la programmation conduit à construire les mêmes logements qu'ailleurs. On ne prend pas en compte une potentialité de l'existant pour se dire que l'habitation peut aussi changer considérablement. Je pense que l'utopie moderniste commence aujourd'hui, justement. Avec cette notion de recyclage de situations qui permet des stratégies d'assemblages, d'hybridation, de transformation, générant des complexités auxquelles on ne pourrait pas aboutir en gommant l'existant. Aujourd'hui nous avons accumulé assez de matière et il n'y a plus d'acte qui relève de la «création», au sens traditionnel et beaux-arts du terme. On est toujours en phase de modification d'une situation qui existe, liée à des facteurs économiques existants, à des territoires déjà occupés. Nous ne sommes plus dans la situation des années 70/80, durant lesquelles on lançait des commandes qui laissaient croire que l'on pouvait encore inventer la ville. Mais ça n'est pas être moins ambitieux que de dire aujourd'hui qu'on doit la modifier. La transformation est un acte culturel."(Druot F., Lacaton A. & Vassal J.-P., *Plus*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.)

9 Druot F., Lacaton A. & Vassal J.-P., *Plus*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.

10 Delera A., Rota R., *Riqualificazione energetica e architettonica dei grands ensembles dégradés. L'esperienza francese*, in "Il Progetto Sostenibile", Manzano (Udine), Giugno 2011, Anno 9 - n° 28, pp. 46-51.

I.2 RECUPERO DEI SISTEMI COSTRUTTIVI DI INVOLUCRO

In linea con l'obiettivo fissato dalla Comunità Europea¹¹ che stabilisce il raggiungimento, entro il 2020, del risparmio del 20% di energia e della riduzione del 20% delle emissioni di CO₂, l'intervento di recupero arriva ad assumere attualmente caratteristiche globali, a livello di edilizia pubblica e privata. In quest'ottica, si sono attivate molteplici sperimentazioni e ricerche per indagare le possibilità di riqualificazione di interi complessi edilizi attraverso il raggiungimento di alti livelli di prestazione termica, tramite l'attuazione di interventi sull'involucro degli edifici, dall'esito architettonico soddisfacente: l'aumento della superficie degli alloggi attraverso l'aumento volumetrico in facciata o la sopraelevazione; l'inglobamento di balconi e logge e l'aggiunta di serre bioclimatiche; il controllo della fattibilità finanziaria degli interventi e la restituzione di edifici nei quali gli abitanti si possano riconoscere positivamente.

In particolare, anche i risultati delle esperienze francesi indagate e sperimentate attraverso i numerosi programmi e progetti¹² di riqualificazione architettonica e urbana hanno dimostrato quanto sia realmente possibile pensare a un futuro interessante e architettonicamente valido per tutta quella parte del patrimonio costruito degradato che viene attualmente abbandonato o destinato alla demolizione. Le numerose proposte progettuali emerse durante gli ultimi anni evidenziano una linea di ricerca orientata all'adozione di buone pratiche di assemblaggio a secco, andando a definire una sorta di "pelle tecnologica", il cui ruolo energetico è essenziale per la regolazione degli apporti solari, garantendo un adeguato comfort invernale, senza pregiudicare quello estivo. Questa "nuova pelle" può talvolta consentire anche l'espansione del corpo edilizio, aumentandone la volumetria a

11 Direttiva 2010/31/UE del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia

12 Molteplici studi e progetti di ricerca si sono svolti in questo ambito, fra cui si rilevano alcune importanti esperienze sviluppare in territorio francese (riportate di seguito, in ordine cronologico):

- Ricerca commissionata nel 2004 a Druot F., Lacaton A. e Vassal J.-P., dalla *Direction de l'Architecture et du Patrimoine* del Ministero della Cultura francese e applicata a cinque casi esemplari: Aulnay-sous-bois, Le Havre, Nantes, Rouen, Trignac (lavoro pubblicato in Druot F., Lacaton A. & Vassal J.-P., *PLUS - Les Grands ensembles de logements - Territoires d'exception*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.). Lo studio mette in evidenza la maggiore convenienza economica ad intervenire sul patrimonio edilizio esistente, confrontando l'investimento medio di 167.000 € per alloggio nel caso di demolizione e ricostruzione con i soli 17.000 € per riqualificare l'esistente;
- Progetto *Power House Europe (PHE)*, cofinanziato dalla Commissione Europea, atto a promuovere il risparmio energetico nel settore civile, proponendosi l'obiettivo di diffondere i risultati del Programma IEE (Intelligent Energy Europe) e di realizzare lo scambio di esperienze sul tema della riqualificazione energetica dell'edilizia sociale, sfruttando l'enorme potenziale costituito dalle organizzazioni che operano in Europa in tale settore;
- Programma *Requalification à Haute Performance énergétique de l'Habitat collectif (REHA)* del 2007: si inserisce tra gli obiettivi di riduzione di almeno il 38% dei consumi energetici negli edifici esistenti che le politiche del Governo francese in materia di ecologia e sviluppo sostenibile, attraverso gli incontri di Grenelle Environnement, si è prefissata di raggiungere entro il 2020. Tale Programma, supportato da MEEDDM (Ministero dell'Ecologia, dell'Energia, dello Sviluppo Sostenibile e del Mare) e da PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture), e condotto in collaborazione con PREBAT (Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Energie dans le Batiment), ha trovato l'appoggio di numerose associazioni ed enti che si occupano di questioni abitative in generale.

vantaggio di una migliore organizzazione tipologica e di un'offerta più ampia in termini di superficie o numero di alloggi. Le proposte presentate si muovono complessivamente verso la volontà di proporre un vero e proprio rivestimento e ridisegno dell'edificio, raggiungendo una buona sintesi tra la necessità di miglioramento prestazionale ed energetico e di rinnovamento estetico, che modifichi sostanzialmente il rapporto del costruito con il contesto e rimuova l'immagine frequentemente anonima e priva di identità che omologa l'edilizia europea degli anni 1960-80.

Questa complessa problematica necessita di un'ampia ricerca a livello globale, che veda la collaborazione di architetti e ingegneri, industrie e imprese. In particolare, l'ampliamento della pletora di soluzioni progettuali si impone necessario, in particolar modo per gli interventi che coinvolgono le facciate.

Attualmente, la maggior parte degli interventi di trasformazione è imprescindibile da un sensibile miglioramento del comportamento energetico dell'edificio. In particolare, il patrimonio edilizio recente, realizzato a partire dal secondo dopoguerra, è costituito da un insieme di fabbricati realizzati durante un'epoca in cui il costo dell'energia non influiva in modo radicale sui sistemi di riscaldamento, motivo per il quale essi sono stati progettati senza prestare particolare attenzione all'isolamento termico. Le carenze riscontrabili oggi nelle prestazioni energetiche di questi edifici si ripercuotono in modo negativo non solo in regime invernale, portando a un innalzamento elevato dei costi di riscaldamento, bensì anche in regime estivo, durante il quale l'assenza di raffrescamento risulta penalizzante per il comfort interno, venendo talvolta sopperita con soluzioni impiantistiche non attente all'integrazione con le preesistenze.

In questo contesto, il progetto di recupero rappresenta un'opportunità per raggiungere una riqualificazione energetica attraverso una diminuzione dei consumi in fase di esercizio, attraverso l'implementazione della capacità isolante dei sistemi di chiusura e, naturalmente, un contestuale adeguamento degli impianti. A questo obiettivo primario di riqualificazione, si aggiunge un miglioramento dell'assetto funzionale e distributivo che spesso determina una sensibile riconfigurazione dell'edificio: in base alle modifiche concesse dagli attuali parametri urbanistici, questo può implicare anche l'attuazione di una modifica volumetrica, tramite la "strategia dell'addizione", che prevede l'aggiunta di uno o più elementi costruttivi disposti in adiacenza a differenti porzioni dell'edificio esistente, dotati di dimensioni e caratteristiche costruttive variabili in funzione delle esigenze richieste. Naturalmente, è importante valutare l'addizione di volumi a un fabbricato esistente in relazione alle variazioni significative che essi potrebbero apportare non soltanto dal punto di vista prestazionale, ma anche di in termini di impatto estetico-architettonico e del rapporto con il contesto.

In particolare, si individuano tre modelli principali di addizione che, a loro volta, possono essere variati, generando una pluralità di soluzioni sotto il profilo sia morfologico che tecnologico,

distinte per le specifiche opportunità di espansione e le differenti modalità di conseguimento delle caratteristiche qualitative, prestazionali ed energetiche inizialmente fissate¹³:

1. *Addizione al piede*: realizzazione di un nuovo volume, strutturalmente e geometricamente indipendente, posta al piede dell'edificio su uno o più lati del perimetro. Tale soluzione offre quindi la possibilità di ospitare agevolmente anche dotazioni impiantistiche di dimensioni e peso rilevanti, senza che esse influenzino le condizioni di carico dell'edificio preesistente. Inoltre, l'assetto geometrico favorisce la connessione fra i percorsi, favorendo la corretta gestione di eventuali accessi indipendenti, in relazione con il tessuto circostante. Questo tipo di addizione può essere collocata a raso rispetto al suolo, a un livello seminterrato, oppure in sospensione.
2. *Addizione in facciata*: realizzazione di uno o più volumi in continuità con una o più facciate dell'edificio. Dal punto di vista strutturale e geometrico essa può risultare indipendente dall'edificio preesistente, poggiando a terra tramite fondazioni proprie, o configurandosi come un elemento a sbalzo gravante, quindi, sulle strutture esistenti. L'assetto geometrico tende a privilegiare le relazioni distributive ai diversi livelli, ma può anche essere sfruttato per creare nuovi collegamenti verticali. Tale addizione può configurarsi sotto forma localizzata su limitate porzioni di facciata (puntuali o lineari), oppure su porzioni estese che delimitano una vera e propria "controfacciata".
3. *Addizione in copertura*: realizzazione di uno o più volumi, strutturalmente e geometricamente dipendenti dalle caratteristiche e dalla capacità portante dell'edificio preesistente, posti in copertura. Oltre a garantire una potenziale riconfigurazione distributiva che coinvolge inevitabilmente anche i sistemi di collegamento verticali, offre la possibilità di alloggiare in copertura le nuove dotazioni impiantistiche e di prevedere l'implementazione delle reti mediante nuovi circuiti a calata dall'alto. Questo tipo di addizione può essere sviluppata mediante l'aggiunta di volumi dislocati puntualmente, oppure sotto forma di porzioni più estese, fino a poter ricoprire interamente la copertura dell'edificio esistente.

Una volta analizzate le condizioni al contorno e stabilito entro quali limiti urbanistici è possibile operare, preliminarmente alla fase progettuale vera e propria, una seconda valutazione fondamentale deve essere affrontata, per quanto concerne l'assetto strutturale dell'edificio e le condizioni di carico determinate dall'addizione. In particolare, gli interventi di recupero dell'involucro edilizio mediante la realizzazione di una "seconda pelle" rientrano all'interno delle addizioni in facciata, che si distinguono in addizioni autoportanti, appoggiate a terra, e addizioni portate, con volume a sbalzo.

13 Gaspari J., *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto del recupero*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2012.

Nel caso di addizioni in facciata, è necessario distinguere le soluzioni in due tipologie:

1. *Addizioni in facciata con volume di appoggio a terra*: concepite come strutture autoportanti con fondazioni proprie, che trasmettono l'intero carico al suolo senza aggravare le strutture preesistenti. La connessione tra l'elemento di involucro aggiuntivo e la facciata esistente del fabbricato è garantita da un sistema di ancoraggio meccanico puntuale per la ripresa delle forze orizzontali e la stabilità della facciata.
2. *Addizioni in facciata con volume a sbalzo*: concepite come strutture portate, il cui carico deve essere supportato da una struttura ancorata a quella preesistente. Nella maggior parte dei casi, quindi, si ricorre a sistemi di ancoraggio leggeri a telaio o a tassellazione puntuale, a seconda delle caratteristiche del sistema costruttivo scelto per la realizzazione del nuovo involucro. La soluzione più frequente, specialmente in ambito di facciate ventilate, consiste nell'utilizzo di telai metallici con tamponamenti stratificati.

Nell'ambito degli interventi volti al recupero dell'involucro edilizio del patrimonio esistente, al fine di condurre un intervento compatibile e adeguato alla struttura esistente, occorre procedere a una approfondita fase di analisi, affiancata dalla verifica dei principali fattori coinvolti nel progetto: verifica strutturale dell'esistente, in rapporto alle condizioni di carico derivanti dall'addizione in facciata; verifica del comportamento energetico in fase di esercizio; verifica incrociata delle condizioni prestazionali, strutturali ed energetiche, dell'intervento di progetto.

I.2.1 L'INVOLUCRO ARCHITETTONICO COME SISTEMA "ATTIVO"

Secondo la definizione più comunemente accettata in ambito architettonico, l'aggettivo "attivo" viene attribuito ai sistemi solari di cui è dotato un edificio, in grado di captare, accumulare e utilizzare l'energia proveniente da fonti rinnovabili con una tecnologia di tipo impiantistico.

In quest'ottica, essi si distinguono dai sistemi solari di tipo "passivo", i quali utilizzano esclusivamente l'energia solare per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici, facendola fluire attraverso l'edificio durante l'intero percorso che, dalla fase di collezione, la porta a quella di accumulo e distribuzione. A seconda del tipo e del livello di sofisticazione, per il funzionamento di questi sistemi passivi possono essere necessarie operazioni di controllo del flusso dell'energia termica in entrata e uscita, svolte direttamente tramite gli elementi costruttivi che lo compongono.

Uno dei più noti esempi di sistema solare passivo a guadagno diretto è costituito dal muro di Trombe-Michel, ossia una parete ad accumulo che, per la sua stessa conformazione e natura costruttiva, è in grado di autoregolarsi e dunque di garantire un comportamento variabile in funzione dell'andamento ciclico, giornaliero e stagionale¹⁴.

I sistemi solari attivi, invece, capaci di sfruttare l'irraggiamento solare garantendo un miglioramento del comportamento termico, e dunque energetico, dell'edificio, sono costituiti dai sistemi tecnologici fotovoltaici per la produzione di energia elettrica¹⁵ e dai sistemi solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria¹⁶.

All'interno del testo, si intende rivolgersi a un altro significato all'aggettivo "attivo" in campo architettonico, più specificamente rivolto al comportamento energetico globale del sistema di

14 I tre elementi essenziali costituenti un sistema solare passivo sono: i collettori per la captazione solare; le masse di accumulo per l'immagazzinamento del calore e il successivo rilascio in assenza di sole; i componenti di controllo per regolare il funzionamento dei sistemi in funzione della temperatura esterna. Nel muro di Trombe, il collettore di energia fa parte dell'involucro e riceve direttamente la radiazione solare dall'esterno, impedendone l'ingresso all'interno dell'ambiente, per poi cederla nuovamente, attraverso l'assorbitore, sotto forma di energia termica trasmessa per irraggiamento e convezione agli ambienti di accumulo, con un ritardo di alcune ore variabile in funzione dei materiali utilizzati e dello spessore dell'assorbitore.

15 I pannelli fotovoltaici sono costituiti principalmente da una cella, ossia una piccola lastra di materiale semiconduttore (generalmente il silicio) che, una volta trattato, genera una differenza di potenziale tra la superficie superiore trattata con fosforo (dotata di carica -) e quella inferiore trattata con boro (dotata di carica +). Per essere sfruttato, il silicio deve essere caratterizzato da una struttura molecolare adeguata, oltre che da un elevato grado di purezza ottenibile soltanto tramite processi complessi e onerosi. La radiazione solare incidente sulla cella fotovoltaica è in grado di mettere in movimento gli elettroni interni del materiale semiconduttore, consentendo il loro spostamento dalla faccia negativa a quella positiva, generando una corrente continua. L'efficienza energetica del pannello è variabile in funzione del tipo di Silicio impiegato, che può presentare una struttura monocristallina, policristallina o ancora amorfa.

16 I pannelli solari servono da collettori per catturare l'energia solare e utilizzarla per produrre acqua calda sanitaria (circa 38-45°C) che viene accumulata in un apposito serbatoio di accumulo, per giungere ai punti di servizio grazie a collegamenti idraulici ed elettrici. Considerando che l'acqua calda prodotta da un collettore solare corrisponde mediamente a 80-130 l/giorno per ogni mq di pannello installato, e considerando che il consumo prevedibile di acqua calda è di circa 30-50 l/giorno a persona, è possibile dimensionare il pannello predisponendo circa 0,5 m² di superficie per ogni utente.

involucro edilizio.

Per involucro architettonico attivo si intende un sistema edilizio che sia in grado di interagire in maniera dinamica con l'ambiente circostante, e dunque di regolare le proprie caratteristiche fisiche in funzione delle condizioni ambientali del contesto in cui l'edificio è inserito. Tale concetto, dunque, va ben oltre il riconoscimento del tipo di dispositivi solari di cui il fabbricato dispone, per comprendere in senso più ampio tutti i sistemi di involucro che, per tipologie costruttiva o per stratificazione dei materiali costituenti le pareti perimetrali, sono capaci di fungere da strumento di regolazione climatica, che ottimizzi il comportamento dinamico delle facciate, in termini prestazionali ed energetici.

Secondo questa definizione di involucro "attivo", inteso come regolabile, adattabile ed efficiente in termini energetici, si afferma il passaggio dalla concezione storica di barriera protettiva dagli agenti climatici, a un sistema in grado di interagire con i contesti esterni e interni, adattandosi ad essi, e "respirando" come una vera e propria pelle dell'edificio. Così come l'epidermide consente agli animali di respirare e autoregolare la propria temperatura corporea, anche l'involucro architettonico rappresenta l'elemento costruttivo fondamentale per favorire il dialogo attivo tra gli ambienti che delimita¹⁷.

Esso, infatti, attraverso la sua adeguata progettazione costruttivo-tipologica e l'interazione sinergica tra i materiali costituenti la sua stratificazione, risulta in grado di dialogare con i fattori microclimatici legati alla temperatura esterna, all'esposizione solare, alla ventilazione naturale e a tutti i fattori da considerare durante la progettazione di un sistema innovativo di involucro.

Il punto nodale della problematica legata alla regolazione termica degli ambienti confinati consiste nella conservazione dell'equilibrio termico durante le variazioni giornaliere e stagionali. La condizione fondamentale per il comfort igrotermico e l'abitabilità degli spazi architettonici, così come per il benessere corporeo e l'esistenza degli esseri viventi, è rappresentata proprio dalla capacità di adattarsi e autoregolarsi, al fine di mantenere sempre un equilibrio termico costante.

In linea con questa analogia, si può affermare che nel bilancio termico che regola il microclima degli edifici incidono i medesimi fattori che influiscono su quello degli esseri viventi, quali la temperatura dell'aria esterna, l'esposizione alla radiazione solare, l'umidità dell'atmosfera, e il moto dell'aria. Il corpo degli esseri umani, in condizioni normali di salute, è caratterizzato da una temperatura media di 37°C, mantenuta costante grazie al processo, spesso inconscio, di autoregolazione e adattamento alle condizioni climatiche esterne svolto dall'organismo sofisticato che lo costituisce. Analogamente, gli animali a sangue caldo sono dotati di particolari meccanismi omeostatici che sono in grado di garantire un mantenimento efficiente della stabilità, in risposta alle sollecitazioni fisiche dell'ambiente esterno.

¹⁷ Per approfondimenti, si consulti il testo: Chiesa G., *Biomimetica, tecnologia e innovazione per l'architettura*, Celid, Beinasco (Torino) 2010.

Grazie a questi meccanismi omeostatici, in funzione della variabilità percettiva di ciascun individuo, il corpo umano riesce ad adattarsi a una ampia gamma di contesti climatici, pur sempre entro i limiti imposti dalla natura e dall'uomo. Infatti, qualora le condizioni caratterizzanti l'ambiente esterno risultino eccessivamente estreme per le capacità adattive del corpo degli esseri viventi, diventa inevitabile ricorrere all'integrazione dei meccanismi di difesa con tecniche e strumenti complementari per la sopravvivenza e il raggiungimento del benessere esistenziale e abitativo.

Proprio a partire da questa necessità fisica, sono nate le principali barriere protettive da sempre impiegate dall'uomo, dai più semplici dispositivi atti a difendersi dalle avversità climatiche, quali il vestiario e gli accessori di protezione da pioggia e sole, fino ai più complessi sistemi, quali gli organismi edilizi coibentati, impermeabilizzati e schermanti. Tutti questi sistemi rivestono l'importante ruolo di elementi di filtro tra l'ambiente esterno e quello interno (microclima del corpo e spazio architettonico), creando un meccanismo di interazione e sinergia, variabile in funzione delle specifiche esigenze.

Analogamente a quanto accade per gli esseri viventi regolati dal loro epidermide, gli spazi architettonici devono essere controllati mediante l'involucro edilizio che, distaccandosi dalla tradizionale concezione di barriera fisica, massiva e protettiva, si eleva a vero e proprio diaframma dal comportamento dinamico, capace di reagire attivamente con il contesto esterno durante le fluttuazioni che alternano il giorno alla notte e l'estate all'inverno.

Fra le vaire componenti edili, la progettazione architettonica dovrebbe focalizzare quindi la propria attenzione anche sull'involucro edilizio che, alla luce di queste considerazioni, non rappresenta soltanto l'elemento identificativo primario di un fabbricato, bensì anche un fondamentale elemento costruttivo di controllo del comportamento termico, e dunque di gestione e contenimento dei consumi energetici, imprescindibile per le attuali esigenze di sostenibilità ambientale¹⁸.

Al fine di raggiungere questo obiettivo e, dunque, di realizzare un involucro edilizio ispirato ai principi di autoregolazione, flessibilità e autoadattabilità, può essere utile volgere uno sguardo agli esempi in natura, tra cui si trovano sofisticati esempi di architettura animale e vegetale, dotati di un'efficienza e di una sostenibilità senza pari.

Su questo assunto si fonda l'Architettura Biomimetica, disciplina che studia la vita (*bios*)

18 "Il cattivo funzionamento di molti edifici moderni può essere attribuito al fatto di aver trascurato questo principio: le pareti vi sono infatti usate in modo estremamente formalistico, e raramente si presta attenzione al clima, alla latitudine, all'orientamento. L'intero compito di mantenere le condizioni interne richieste è affidato agli impianti di riscaldamento e di raffrescamento, con inevitabili sprechi, inefficienze e cattivo funzionamento. I vantaggi della standardizzazione di parti e di componenti prodotti industrialmente sono ovvi. Ma un'analoga standardizzazione di interi edifici che dovranno far fronte alle ampie variazioni climatiche non ha alcun senso. Un edificio del Nordeuropa e uno del Mediterraneo possono benissimo usare gli stessi materiali - metalli, materiali isolanti, vetro, plastica - ma il modo in cui essi sono montati per formare una parete deve essere del tutto diverso per funzionare ugualmente bene." (Herzog T.)

presente in natura, al fine di coglierne le soluzioni e le proprietà più interessanti, e di imitare (*mimesis*) le strategie migliori e i processi più efficienti, traducendole in dispositivi integrabili all'interno del complesso sistema edilizio, secondo un approccio sostenibile.

La Biomimetica¹⁹ promuove quindi l'ispirazione al mondo naturale, vegetale e animale, che durante i secoli ha portato inevitabilmente a una selezione delle strutture, forme e sostanze maggiormente efficienti e adatte per lo svolgimento della vita. L'osservazione e lo studio delle strategie e dei processi presenti in natura può fornire un'ottima fonte di ispirazione per la progettazione di edifici che siano in grado di rispondere ai requisiti di efficienza e comfort abitativo, nel rispetto dei principi di sostenibilità e integrazione ambientale.

Tra le varie forme e strutture in natura, si trovano esempi sofisticati per efficienza termica, fluidodinamica e meccanica.

Tra le strategie bioclimatiche naturali per l'efficientamento energetico, emerge la pelliccia degli *orsi bianchi polari*, costituita da peli dotati di una forma cava e di un colore trasparente che consentono loro di catturare la debole radiazione solare del Polo Nord e di incanalare verso la cute scura che la accumula sotto forma di calore, isolando termicamente, al contempo, gli animali. Un'altra strategia di regolazione termica è attuata dalle *lucertole* del deserto che, essendo animali a sangue freddo, devono far fronte a un'amplificazione delle conseguenze provocate dal notevole sbalzo termico imposto dal clima desertico: durante il giorno, esse assumono un colore più scuro sul dorso per accumulare la radiazione solare e una colorazione più chiara sul ventre per riflettere e respingere il calore proveniente dalla sabbia bollente, con cui cercano di minimizzare la superficie di contatto, sollevando una zampa anteriore e la posteriore alternata [Fig. 1].

Tra le strategie bioclimatiche di fluidodinamica e ventilazione naturale, si rilevano le torri del vento costruite dalle *termiti*, dalla forma allungata per svolgere il duplice ruolo di camino di ventilazione naturale ed elemento di trasmissione del calore per irraggiamento solare: infatti, grazie alla loro struttura e morfologia, le costruzioni alte e sottili sono capaci di mettere in moto un sistema di ventilazione e raffrescamento passivo controllato, la cui velocità varia in funzione delle condizioni climatiche; al contempo, la particolare forma e composizione delle torri consente di massimizzare l'accumulo della radiazione solare sull'ampia superficie esposta durante il sorgere e il tramontare del sole per affrontare le ore fredde notturne e, viceversa, di minimizzare la superficie di accumulo di calore durante le ore più calde della giornata, in cui il sole desertico raggiunge un'inclinazione zenitale e temperature elevate. Emergono inoltre le *api*, che realizzano un alveare a celle esagonali, sfruttando la forma geometrica che consente loro di ottimizzare lo spazio all'interno del favo e la

19 L'espressione "biomimetica" nasce nel 1957, quando l'eccellente Otto Schmidt, inventore, ingegnere e biofisico, conia il termine per definire la combinazione tra biologia e tecnologia, applicata al settore ingegneristico. Risulta interessante come il termine "biomimetica" venga tradotto in inglese coi termini *biomimetics* o *biomimicry*, e spesso venga direttamente associato alle espressioni *bioinspiration* e *bionical creativity engineering*.

capienza delle celle, così come di massimizzare il mantenimento del calore durante i mesi invernali; durante i mesi estivi, invece, le api operaie muovono le ali più velocemente, in modo da creare correnti d'aria sufficienti per rinfrescare l'alveare.

Per quanto riguarda la resistenza meccanica raggiunta dagli esseri viventi del regno animale, sono degne di nota le proprietà (finora irriproducibili da parte dell'uomo) della tela dei *ragni*, costituita da un materiale prodotto naturalmente, che presenta una elevata duttilità e una resistenza cinque volte maggiore rispetto a quella dell'acciaio. Questo materiale naturale è di grande ispirazione per l'uomo che, però, non è ancora riuscito a riprodurlo per la realizzazione di cavi. Un altro esempio notevole per le sue proprietà resistenti è costituito dal becco dei *tucani*, estremamente leggero per consentire agilità durante il volo e, al contempo, talmente resistente da rompere gusci di noce e di altri frutti.

Nel mondo vegetale, invece, un esempio di strategia bioclimatica termica di soleggiamento è dato dalle piante che, come il *basilico*, presentano una disposizione delle foglie sfasata di angoli retti, in modo tale da ridurre al minimo la formazione di ombre tra loro e massimizzare l'irraggiamento solare incidente sulle foglie.

Tra le proprietà interessanti di fluidodinamica attribuite alla vegetazione emerge invece la foglia del *loto*, caratterizzata da una elevata impermeabilità data dalla particolare conformazione superficiale che, mantenendo un ampio angolo di contatto, impedisce a una goccia di bagnare la foglia. Alcuni tipi di *spugne marine*, invece, presentano proprietà di resistenza meccanica degne di nota: esse sono tenute salde al substrato mediante filamenti silicei altamente resistenti, dotati di proprietà simili a quelle delle fibre ottiche, ma rivestite da una guaina esterna ancora più resistente (finora ancora irriproducibili dall'uomo).



[Fig. 1] Esempi di animali che attuano una strategia di cambiamento della loro colorazione al fine di mimetizzarsi o di modificare la captazione della radiazione solare sulla superficie esterna del loro corpo:

(da sinistra a destra) a lucertola del deserto (*Side-blotched lizard*) assume una colorazione più scura del dorso durante il giorno per accumulare la radiazione solare, e una colorazione più chiara sul ventre per riflettere e respingere il calore proveniente dalla sabbia bollente con cui cerca di minimizzare la superficie di contatto, sollevando una zampa anteriore e la posteriore alternata; il camaleonte cambia il proprio colore per mimetizzarsi con l'ambiente in cui è immerso, per sfuggire ai predatori e al contempo per passare inosservato agli occhi delle sue prede; l'octopus varia la sua colorazione per mimetizzarsi col fondale su cui è appoggiato.

L'elenco delle soluzioni innovative ed efficienti adottate dagli esseri viventi in natura potrebbe proseguire con altri numerosi esempi, ma non è questa la sede per approfondire una tematica così vasta come quella dell'Architettura Biomimetica²⁰.

Infatti, i pochi esempi presenti in natura qui forniti sono volti esclusivamente a spiegare in maniera più esaustiva il concetto di involucro "attivo", inteso come intelligente, interattivo, adattivo e autoregolabile, che si vuole promuovere all'interno del lavoro di Tesi.

Queste soluzioni, e molte altre proprietà e attitudini tipiche degli esseri viventi e degli elementi presenti in natura, viventi e non, continuano a ispirare la progettazione di edifici. Esistono quindi già molti esempi in Architettura di edifici bioispirati, per forma geometrica, proprietà fisiche, strategie bioclimatiche, dall'osservazione delle quali è possibile cogliere a pieno il significato di quanto espresso in merito alla realizzazione di componenti di involucro "attivo" [Fig. 2-6].



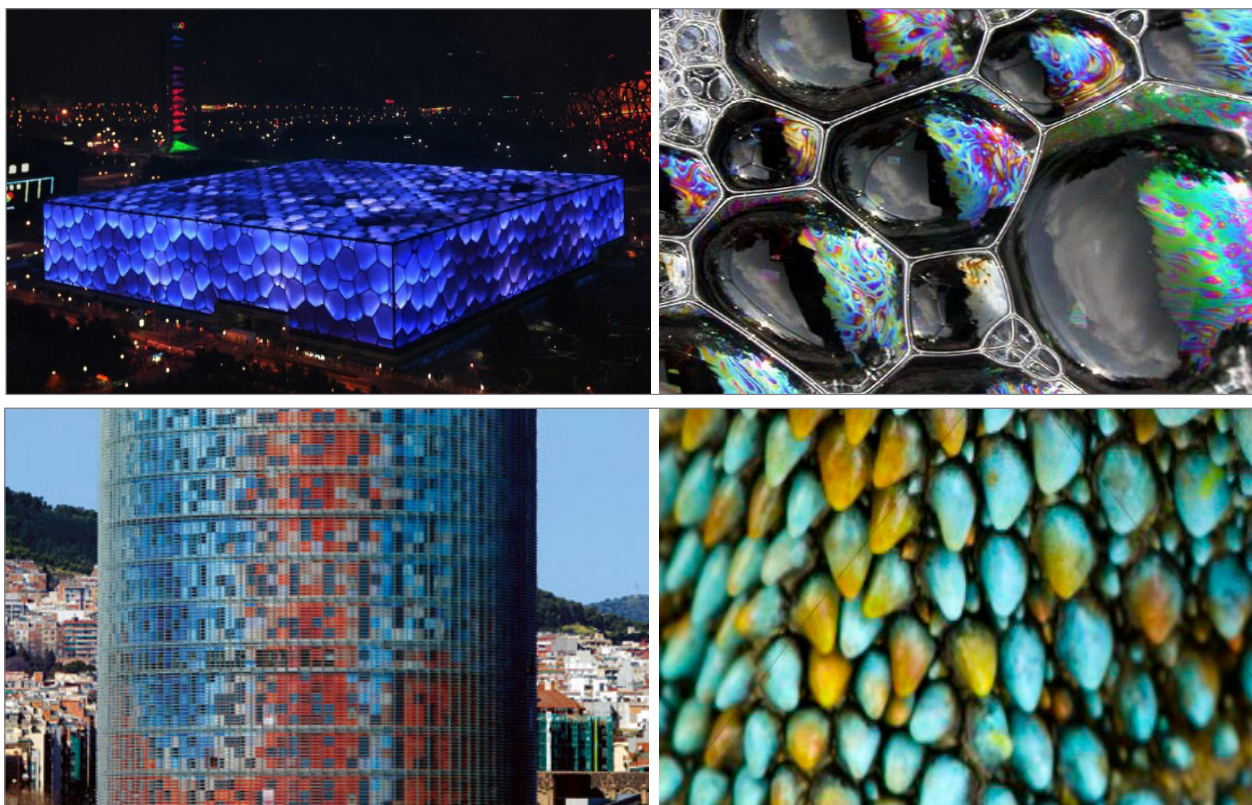
[Fig. 2] (In alto) *Eastgate Centre*, Mick Pearce, Harare (Zimbabwe): la distribuzione architettonica dell'edificio prevede un sistema di raffreddamento "passivo" ispirato ai termitai, costituito da un basamento massivo per l'assorbimento del calore durante il giorno, e da un sistema di raffreddamento che durante la notte consente di accumulare l'aria fredda entrante dall'alto e la distribuisce durante la giornata all'interno degli uffici.

[Fig. 3] (In basso) *Gherkin Tower*, Norman Foster, Londra 2003: l'involucro esagonale della torre si ispira all'esoscheletro della spugna *Venus* che, grazie alla forma cilindrica e alla trama esagonale, resiste bene alle correnti marine.

²⁰ Per approfondimenti, si consulti il testo: Chiesa G., *Biomimetica, tecnologia e innovazione per l'architettura*, Celid, Beinasco (To) 2010.

Come si vedrà nei paragrafi successivi, l'integrazione di una strategia biomimetica o di un materiale a comportamento bioispirato, abbinata a una corretta ed accurata strategia di progettazione, consente di realizzare un involucro edilizio notevolmente performante, in quanto capace di interagire con il contesto e di adattarsi alle variazioni climatiche esterne, consentendo un'ottimizzazione dell'efficienza energetica.

In aggiunta a tutte queste riflessioni, occorre considerare anche un ulteriore fattore che potrebbe integrare e completare, dal punto di vista prestazionale ed energetico, il complesso sistema che costituisce l'organismo edilizio. A partire dalla seconda metà del XX secolo, infatti, si è verificato un sempre maggiore sviluppo di tecnologie elettroniche che progressivamente ha sostituito i dispositivi meccanici: questo fenomeno ha coinvolto tutti i settori, a partire da quello fotografico, automobilistico, medico, fino all'ambito costruttivo e architettonico.



[Fig. 4] (In alto) *Water Cube*, PTW Architects, Pechino (Cina) 2007: edificio sportivo ispirato alla forma delle bolle di sapone, naturalmente assemblate secondo una configurazione geometrica di stabilità intrinseca, per la realizzazione di un involucro costituito da una membrana in ETFE - Etilene Tetrafluoretilene ancorata a una struttura di supporto in acciaio.

[Fig. 5] (In basso) *Agbar Tower*, Jean Nouvel, Barcellona (Spagna) 2004: così come le scaglie costituenti l'epidermide dei rettili sono capaci di ruotare e cambiare colore a seconda delle sollecitazioni esterne, l'involucro della torre è caratterizzato da un'illuminazione notturna a LED integrata a sensori termici in grado di regolare l'apertura delle finestre in funzione della radiazione solare, riducendo il consumo di energia per gli impianti di condizionamento.

Anche in architettura, infatti, la volontà di realizzare un involucro edilizio “attivo”, capace di interagire sinergicamente con l’ambiente esterno, al fine di regolare e ottimizzare la qualità dell’ambiente interno, si è tradotta sotto forma di molteplici strategie e pratiche di intervento, tra cui anche l’integrazione della domotica.

La domotica, intesa come scienza interdisciplinare dedicata allo studio di tecnologie volte a migliorare la qualità della vita all’interno degli spazi abitativi, si fonda sull’integrazione di conoscenze e tecniche appartenenti agli ambiti disciplinari dell’automazione, dell’elettrotecnica e dell’elettronica, della telecomunicazione e dell’informatica, dell’ingegneria edile ed energetica.

Attraverso l’integrazione dell’intelligenza artificiale sotto forma di dispositivi e strumenti di controllo e gestione degli impianti e dei sistemi impiantistici presenti all’interno di un ambiente abitativo, è possibile concepire un elemento costruttivo di involucro ulteriormente efficiente, in grado di ottimizzare il consumo di energia, di facilitarne la gestione e di accorciarne le tempistiche, nell’ottica di una riduzione dei costi e degli sprechi.

In questo modo, i dispositivi elettronici di controllo del sistema di raffrescamento e riscaldamento termico, di regolazione dell’illuminazione e di controllo e gestione dell’acqua sanitaria possono essere gestiti secondo un approccio più efficiente dal punto di vista dell’interazione sinergica tra interno ed esterno, che tendono a coincidere, in quanto componenti alla pari di un’unica struttura informativa.



[Fig. 6] *BIQ – Das Algen Haus*, Splitterwerk, Wilhelmsburg (Germania) 2013: edificio residenziale ispirato alla fotosintesi clorofilliana attivata dal Fitoplancton. Le pareti perimetrali del fabbricato sono rivestite da pannelli di vetro, simili a persiane, in cui è alloggiata la piantagione intensiva delle microalghe di Fitoplancton che, grazie al processo di fotosintesi, assorbono le radiazioni di CO_2 . Inoltre, le microalghe costituiscono la biomassa da cui estrarre il metano per la produzione di energia termica ed elettrica per l’impianto di riscaldamento.

I.2.2 SOLUZIONI TECNOLOGICHE PER IL RECUPERO DELL'INVOLUCRO

Nell'ampio scenario dell'architettura contemporanea, si assiste sempre di più alla prevalenza di sistemi costruttivi leggeri e trasparenti, allontanandosi progressivamente dalla *firmitas* vitruviana che, nell'architettura classica, associa agli edifici i valori di peso e struttura.

Alla luce dei principi di sostenibilità ambientale da perseguire in ogni aspetto della vita quotidiana, anche nell'architettura i progettisti si orientano sempre maggiormente a sistemi costruttivi che siano reversibili, riciclabili, facili da montare e smontare, trasportabili, e dunque leggeri.

In generale, si può quindi affermare che sono stati lentamente abbandonati i caratteri di tectonicità propri dell'architettura storica, per avvicinarsi sempre di più a un sistema di involucro leggero, trasformabile, permeabile, "attivo", dunque in grado di interagire con il contesto e con le esigenze dell'utenza al fine di garantire un ambiente costantemente confortevole.

Di seguito si intende fornire una classificazione delle soluzioni tecnologiche di involucro attuali, impiegate tanto nella costruzione del nuovo quanto negli interventi di riqualificazione, per fornire un quadro dello stato dell'arte di riferimento per l'elaborazione delle soluzioni progettuali di facciata proposte all'interno del *Capitolo III - Sperimentazione costruttiva*.

In particolare, tra le differenti tipologie di classificazione che possono essere fatte, si sceglie di procedere analizzando gli aspetti relativi alle strategie bioclimatiche e di regolazione termica, affrontandone le principali problematiche legate alla composizione, alla messa in opera e alle caratteristiche prestazionali energetiche.

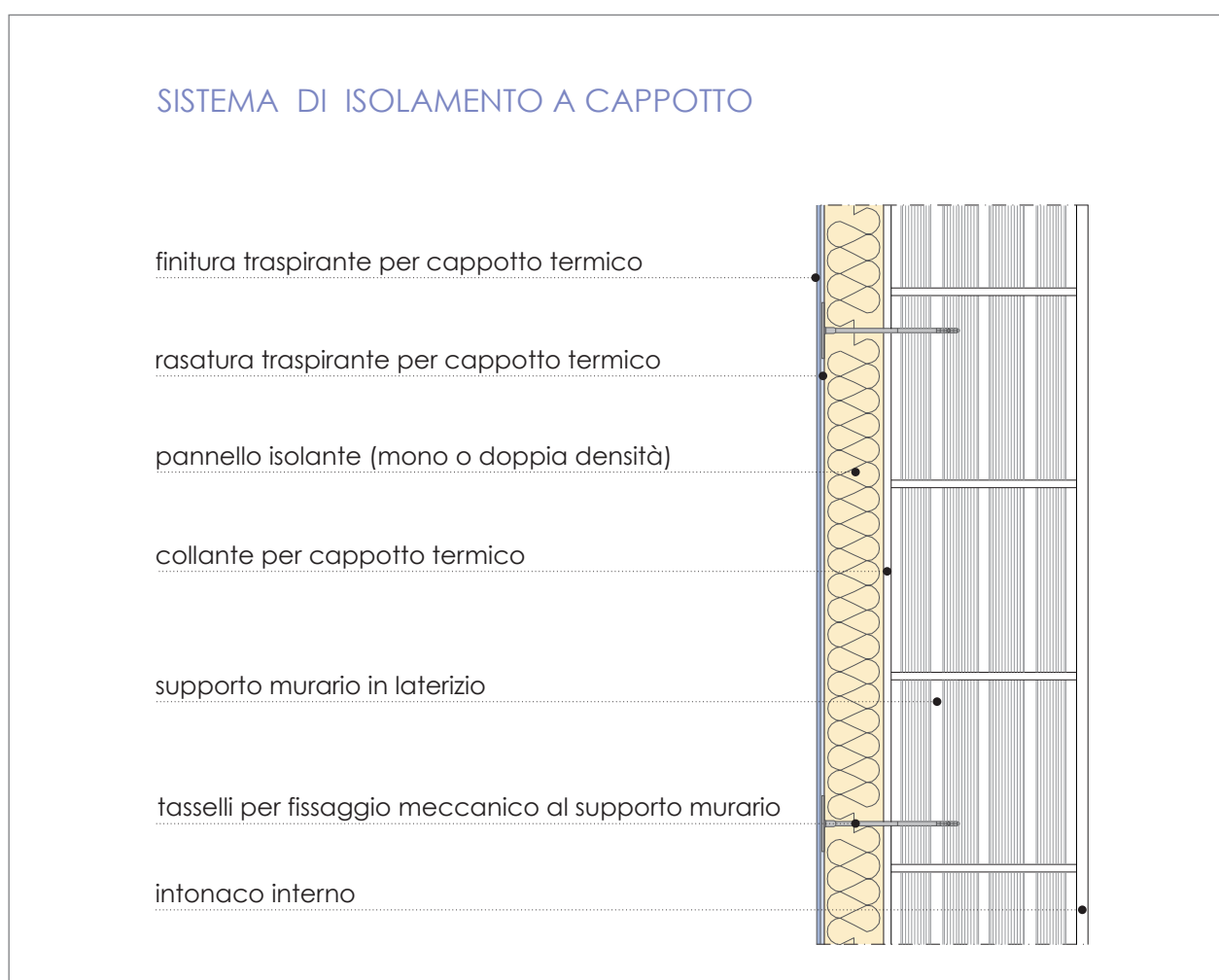
In quest'ottica, si possono identificare le seguenti soluzioni di facciata:

- Sistema di isolamento termico a cappotto (*ETICS - External Thermal Insulation Composite System*);
- Sistema *vêture*;
- *Shading screen*;
- Facciata ventilata;
- Facciata continua a doppia pelle;
- Muro *Trombe-Michel*;
- Facciata in vetro strutturale;
- Involucro massivo strutturale;
- Involucro naturalizzato.

SISTEMA DI ISOLAMENTO TERMICO A CAPPOTTO

Tra le tradizionali soluzioni tecnologiche per la riqualificazione dell'involucro si trova il sistema di isolamento termico a cappotto, costituito da uno strato di materiale isolante termico, abbinato a uno strato di finitura, applicato esternamente alla facciata esistente, mediante uno strato di colla e un sistema di connessione meccanica puntuale [Fig. 7].

Il cappotto rappresenta la soluzione maggiormente impiegata in ambito di riqualificazione energetica, in quanto fornisce la risposta più efficace e rapida alle problematiche prestazionali legate ai ponti termici causati dalle discontinuità costruttive delle facciate esistenti, derivanti dall'eterogeneità dei materiali e dalle loro differenti dilatazioni termiche. Il sistema a cappotto, infatti, risponde principalmente alle attuali esigenze di efficientamento energetico, fornendo una valida soluzione per garantire agli edifici protezione dagli agenti atmosferici e, grazie all'adozione di at-



[Fig. 7] Dettaglio costruttivo di un sistema tipo di isolamento termico a cappotto.

tente misure da parte di chi realizza gli altri elementi costruttivi costituenti l'involucro, anche una funzione di tenuta all'aria.

La norma ETAG 004, già citata precedentemente, definisce il sistema a cappotto (*ETICS - External Thermal Insulation System*) come un sistema di elementi costruttivi costituito da diversi componenti specifici prestabiliti:

- collante;
- materiale isolante;
- tasselli (se necessari);
- intonaco di fondo;
- microarmatura (rete in tessuto di fibra di vetro);
- intonaco di finitura (rivestimento con eventuale fondo adatto al sistema);
- eventuali accessori aggiuntivi (rete angolare, profili per raccordi e bordi, giunti di dilatazione, profili per zoccolatura, ...).

Lo strato isolante viene applicato direttamente sulla facciata, mediante tasselli, oppure su una struttura intelaiata di supporto: in entrambi i casi occorre comunque prestare molta attenzione alla disposizione dei pannelli e alle modalità di posa in opera, con particolare sguardo verso lo sfalsamento dei giunti, al fine di evitare o comunque minimizzare fenomeni di infiltrazione e di condensa. La scelta del sistema di ancoraggio dello strato isolante alla facciata esistente dipende dalle scelte progettuali e dalle caratteristiche costruttive delle pareti esterne.

In particolare, le facciate di supporto idonee per l'applicazione dei sistemi a cappotto sono:

- calcestruzzo alveolare (secondo la norma EN 771-4);
- mattoni pieni e forati (secondo le norme EN 771-1 e EN 771-3);
- mattoni e blocchi in calcestruzzo, pesanti e leggeri (secondo la norma EN 771-3);
- calcestruzzo tradizionale (secondo la norma EN 206-1);
- pareti in calcestruzzo realizzate con casseri a perdere in legno-cemento, con o senza isolamento aggiuntivo integrato (secondo la norma EN 15498).

Sotto forma di pannelli di dimensioni limitate, il sistema può essere costituito da differenti materiali isolanti, variabili in funzione delle prestazioni ricercate e della valutazione dei costi-benefici. In ogni caso, il sistema funziona se realizzato con materiali che presentino i requisiti di stabilità dimensionale, buona conducibilità termica, buona resistenza meccanica (a trazione e compressione) e buoni valori di permeabilità al vapore.

I materiali isolanti attualmente più utilizzati per realizzare sistemi a cappotto sono il polistirene espanso sinterizzato (sigla "EPS" secondo la norma EN 13163) e la lana di roccia (sigla "MW" secondo la norma EN 13162) sotto forma di lastre. Nelle aree esposte a spruzzi d'acqua si utilizzano polistirene espanso sinterizzato ad alta densità, oppure polistirene espanso estruso (sigla "XPS" secondo la norma EN 13164). In generale, per la selezione dei materiali isolanti si fa riferimento

alle specifiche tecniche ETICS contenute nell'ETAG 004 e alle relative certificazioni ETA.

Una volta realizzato lo strato coibente, qualora i pannelli non prevedano già una finitura ultima, si procede alla stesura dell'intonaco: generalmente, sullo strato isolante viene dato un primo strato di malta, seguito da una microrete di rinforzo in fibra di vetro e da uno strato di rasatura, sul quale viene steso, infine, l'intonaco di finitura. Per ottenere un migliore risultato finale, dal punto di vista estetico-architettonico e prestazionale, tutti i materiali applicati per realizzare il rivestimento finale devono presentare buone caratteristiche di idrorepellenza e permeabilità al vapore.

Per permettere una migliore aderenza dell'intonaco allo strato isolante, la superficie esterna del pannello è sagomata e i suoi bordi sono conformati a spigoli vivi per facilitare la messa in opera. Inoltre, al fine di ottimizzare l'aderenza del rivestimento, è necessario inserire una microarmatura collegata meccanicamente al supporto mediante un sistema di connessione studiato in relazione alla conformazione delle lastre.

Per quanto concerne le problematiche legate alla tenuta all'acqua, l'elevato rischio di fessurazione dell'intonaco non permette di assicurare l'impermeabilizzazione completa del sistema di facciata. Per ridurre la possibilità di formazione di setole e fessurazioni del rivestimento, e di conseguenza di infiltrazioni di umidità, possono essere impiegati speciali tipi d'intonaco, eventualmente fibro-rinforzati che, peraltro, garantiscono anche una buona resistenza agli urti.

Infine, occorre osservare che la normativa non prende in considerazione altri aspetti che possono avere una loro influenza sull'aspetto energetico, come ad esempio il colore delle facciate. Da questo punto di vista è consigliabile scegliere colori chiari, o in alternativa colori a base di pigmenti freddi, in modo da respingere e riflettere la radiazione solare durante le ore e le stagioni più calde, raggiungendo così minori temperature superficiali in parete durante la stagione estiva. In particolare, per ottimizzare il comportamento prestazionale dei sistemi a cappotto durante le ore più calde, è consigliabile l'utilizzo di colori con un indice di riflessione IR3 superiore al 30%.

In conclusione, si può dire che il sistema a cappotto consente di realizzare pareti opache molto performanti dal punto di vista termico, in grado di migliorare notevolmente il comportamento energetico degli edifici, sia nell'ambito della nuova costruzione, sia nel settore del recupero del patrimonio esistente. Apprezzando e sfruttando le proprietà del materiale isolante selezionato, in relazione alle sue proprietà fisiche, meccaniche e termiche, è possibile ottenere involucri edilizi dotati di elevate prestazioni energetiche.

Una corretta progettazione della parete opaca mediante un sistema a cappotto consente di sfruttare al meglio le prestazioni dei singoli materiali scelti e abbinati per la composizione della facciata, risolvendone le problematiche legate alla formazione di ponti termici, alle dispersioni termiche e alle modalità di posa in opera, in termini di tempo e accessibilità.

Da questo insieme di riflessioni nasce l'idea di proporre un sistema a cappotto per il recupero e l'efficientamento dell'involucro esistente, basato sull'applicazione dei principi di sostenibilità,

adattabilità e reversibilità, costituenti i paradigmi di ricerca. Come verrà illustrato all'interno del *Capitolo III*, il sistema proposto prevede la realizzazione di pannelli prefabbricati costituiti da uno strato variabile di materiale isolante ecosostenibile che, sotto forma di malta, viene gettato all'interno di una cassaforma a perdere, costituita da una struttura in materiale leggero di riciclo, ad alta resistenza meccanica, dotata di una particolare geometria a trama esagonale per il tassellamento della superficie di involucro.

Il carattere innovativo della soluzione progettuale proposta, denominata *G-SKinnED* (*Geopolymers – Sustainable Key for an innovative Envelope Design*), consiste principalmente nell'utilizzo di un nuovo materiale geopolimerico, a base ceramica, ottenuto dal riutilizzo di scarti di lavorazione trattati secondo un processo attivabile a temperatura ambiente, dunque con ridotto impatto ambientale. Un ulteriore fattore innovativo consiste nella particolare geometria complessa costituita da celle esagonali di dimensione variabile, a formare una sistema di tassellamento di facciata basato sulle istanze di ricerca volte all'ottimizzazione dello spazio e alla massimizzazione della resistenza meccanica, a fronte di una minimizzazione del peso.

Ulteriori ricerche e analisi, sviluppabili nell'ambito di future ricerche, possono dimostrare, anche quantitativamente, le potenzialità offerte da tale sistema flessibile di involucro, disegnato “su misura”, per adattarsi alla geometria degli edifici esistenti, costituito dall'assemblaggio di pannelli prefabbricati progettati con software di design parametrico e realizzati con stampanti 3D.

Oltre ai caratteri legati alla riqualificazione estetico-architettonica e alla resistenza meccanica dei componenti di facciata “attiva” configurati, è possibile apprezzare il miglioramento prestazionale conseguibile mediante l'adozione di questa soluzione costruttiva di involucro basata sull'impiego di un materiale isolante innovativo, come quello proposto.

SISTEMA VÊTURE

Il sistema *vêture* rappresenta un particolare tipo di rivestimento esterno di facciata, costituito da componenti leggeri prefabbricati, formati da uno strato di materiale isolante e da un rivestimento in lastre [Fig. 8].

Oltre ad agire come elemento di involucro atto a ridurre i ponti termici, questo rivestimento contribuisce a incrementare l'inerzia termica della parete esterna, e a proteggere gli elementi strutturali dagli agenti aggressivi, mediante un sistema a secco di facile e rapida posa in opera. Il materiale più comunemente impiegato per realizzare lo strato isolante termico è il polistirene espanso sinterizzato (EPS), caratterizzato da buone capacità isolanti e da un minore assorbimento dell'acqua. Per quanto riguarda lo strato di rivestimento, invece, i materiali maggiormente impiegati sono lamiera metalliche di alluminio o di acciaio, prodotti minerali come il fibrocemento, o ancora prodotti organici come polistirene rinforzato con fibra di vetro, PVC estruso, stratificato

fenolico.

I pannelli prefabbricati vengono applicati direttamente al supporto tramite un sistema di fissaggio meccanico, senza necessitare dell'ausilio di un'orditura continua, mentre la connessione tra un pannello e l'altro avviene per incastro o per sovrapposizione. Queste modalità di posa costituiscono un considerevole vantaggio negli interventi di recupero, in termini di rapidità e facilità, potendo dunque essere affidate a personale non specializzato. Inoltre, la battentatura degli elementi, che comprende sia l'isolante sia il rivestimento, rappresenta un dettaglio costruttivo che contribuisce notevolmente alla protezione della facciata dalle infiltrazioni di acque meteoriche.

I sistemi di facciata di questo tipo devono essere verificati dal punto di vista termoigrometrico e meccanico. In particolare, occorre verificare la dimensione del giunto e la tipologia di aggancio alla muratura, in termini di numero di tasselli necessari, quantificando e valutando lo stato tensionale del pannello isolante in corrispondenza delle zone di fissaggio. Per assorbire gli spo-

SISTEMA VÊTURE

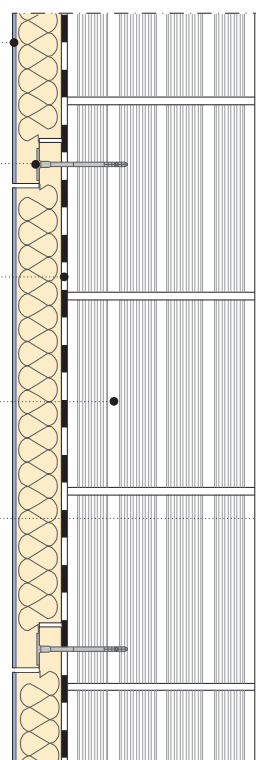
pannello isolante battentato
dotato di strato di finitura e tenuta all'acqua
(giunti ottimali $s=6$ mm)

tasselli per fissaggio meccanico puntuale
al supporto murario

strato drenante

supporto murario in laterizio

intonaco interno



[Fig. 8] Dettaglio costruttivo di un tipo di sistema vêtura.

stamenti relativi dei pannelli, causati dalle sollecitazioni termiche agenti sulla facciata esterna di rivestimento, i giunti devono avere uno spessore minimo di 6 mm. Inoltre, per limitare le rotazioni dei bordi dei pannelli e le sollecitazioni a carico dei tasselli, questi ultimi devono essere impiegati in un numero pari a cinque per ogni pannello.

Gli elementi bidimensionali previsti dal sistema a *vêture* sono modulari e prefabbricati, offrendo la possibilità di essere pre-assemblati e posati in modo semplice e rapido, direttamente sulla facciata, senza l'ausilio di strutture di supporto. Nonostante sia basato sull'assemblaggio di elementi modulari, il sistema presenta una sufficiente versatilità di applicazione, soprattutto nei formati di piccola taglia: infatti, gli elementi possono essere facilmente adattati a conformazioni specifiche, semplicemente eseguendo i tagli necessari in cantiere.

Trattandosi di un sistema di isolamento termico di facciata che, come tutti quelli affini, è particolarmente sensibile agli urti, talvolta è richiesta l'integrazione del rivestimento con sistemi di rinforzo. Inoltre, occorre valutare e ridurre i rischi di condensazione, in funzione della permeabilità del rivestimento esterno. Infatti, i sistemi *vêture* si dividono in quelli respiranti, dotati di un rivestimento permeabile al vapore acqueo, e quelli impermeabili, dotati di un indice di permeabilità del rivestimento molto ridotto, minore di 10^{-3} (g/m²).h.mmHg. Queste ultime, se sprovviste di una microventilazione che consenta l'evacuazione di eventuali condensazioni, sono utilizzabili esclusivamente in ambienti a igrometria interna limitata.

L'analisi dello stato dell'arte relativa ai sistemi di isolamento a cappotto che presentano criticità analoghe a quelle dei sistemi *vêture* per tipologie di materiali impiegati ha messo in luce le problematiche che riguardano tali sistemi, legate agli eventuali difetti di tenuta, difficilmente prevedibili e valutabili durante la fase progettuale.

Da queste riflessioni deriva l'interesse crescente della ricerca scientifica verso soluzioni in grado di gestire le infiltrazioni mediante l'integrazione di sistemi di drenaggio ed equalizzazione delle sovrappressioni indotte dal vento. I dati in letteratura²¹ dimostrano infatti che, simulando una condizione d'ingresso dell'acqua piovana attraverso un giunto, per la durata di sei ore, si evidenzia un accumulo nella porzione di facciata in corrispondenza del giunto, pari alla condizione di saturazione (UR > 95%). Sebbene il fenomeno di bagnatura abbia una durata molto ridotta, il muro non riesce ad asciugarsi neanche nell'arco temporale di un mese. Le ricerche finora svolte dimostrano comunque che la presenza di giunti aperti battentati non inficia la resistenza termica del sistema in modo determinante, a tal punto da rendere questo sistema di isolamento termico del tutto equivalente a un rivestimento a cappotto di pari spessore. Ciò che comporta invece un decadimento maggiore, seppur accettabile, consiste nella presenza di uno strato drenante posto sul lato interno del

21 Dogama D., D'Orazio M., *I sistemi vêture per il retrofitting energetico: comportamento termico e tenuta all'acqua*, in Greco A., Quagliarini E. (a c. di), "L'Involucro Edilizio. Una progettazione complessa", Volume 1, ALI-NEA Editrice, Città di Castello (Perugia) 2007, pp. 63-70.

pannello: pertanto, è opportuno integrare il sistema inserendo una barriera impermeabile all'acqua e traspirante all'aria, posta tra la parete esterna e lo strato drenante.

In conclusione, si può affermare che il sistema *vêture*, ampiamente diffuso in Italia, è adattabile a diversi tipologie costruttive, grazie alle sue caratteristiche prestazionali e alla facilità e rapidità di messa in opera. Particolarmente impiegato per gli interventi di efficientamento energetico, questo sistema necessita di una fondamentale fase di verifica dello stato conservativo del supporto su cui viene applicato, in termini di planarità, resistenza meccanica e stabilità igrotermica.

FACCIATA VENTILATA

La parete ventilata rappresenta un particolare sistema di chiusura basato sull'applicazione a secco di pannelli leggeri prefabbricati, posati su una sottostruttura ancorata alla facciata, che consente di ottenere un'intercapedine d'aria tra la parete rivestita da uno strato termicamente isolante e il paramento esterno di rivestimento [Fig. 9].

In particolare, la stratigrafia della tradizionale facciata ventilata prevede uno strato di materiale termicamente isolante posto in adiacenza alla facciata e uno strato di rivestimento esterno, con duplice funzione estetica e di tenuta all'acqua, separate da una camera di ventilazione per la creazione di un passaggio d'aria con "effetto camino".

Il rivestimento esterno, infatti, è ancorato a una sottostruttura di supporto, che può essere costituita da una griglia di montanti e trasversi, o più semplicemente da montanti abbinati all'uso di staffe a L, connessa alla facciata mediante elementi di ancoraggio meccanico puntuale, necessari per la ripresa delle sollecitazioni orizzontali indotte dall'azione del vento e dal peso, seppur limitato, della struttura aggiuntiva. Il rivestimento esterno può essere costituito da lastre ceramiche, lastre o blocchi di pietre naturali, pannelli in fibrocemento, laminati plastici o metallici, o ancora pannelli in vetro.

Rispetto ad altri sistemi di chiusura, la parete ventilata è oggi particolarmente impiegata non soltanto negli interventi di nuova costruzione, ma anche in quelli di riqualificazione dell'esistente, in quanto offre diversi vantaggi: grazie allo strato di rivestimento esterno, distanziato dalla facciata, essa contribuisce a ridurre le infiltrazioni d'acqua e di umidità sulla parete esterna dell'edificio, e inoltre, grazie alla presenza dello strato isolante, essa impedisce la formazione di ponti termici e l'insorgere di fessurazioni. Inoltre, l'aria che circola per moto convettivo all'interno dell'intercapedine (spessa almeno 2 cm) favorisce un raffrescamento dell'ambiente interno durante il periodo estivo e durante le ore calde del giorno, riducendo l'accumulo di calore, e consentendo l'evacuazione del vapore acqueo proveniente dall'interno, diminuendo così anche la possibilità che si verifichino condensazioni interstiziali.

L'azione combinata di ventilazione, innescata all'interno dell'intercapedine, e di isolamento

termico, dato dallo strato coibente, costituisce una efficiente barriera al calore radiante. Il possibile degrado degli strati funzionali costituenti il sistema di facciata viene limitato grazie all'azione di riduzione dell'umidità esterna e degli sbalzi termici, attuata dalla camera di ventilazione.

I benefici derivanti dalla presenza dell'intercapedine d'aria, influenzati dai fattori di velocità, stato termico del flusso d'aria e caratteristiche delle aperture presenti (facciata a giunti chiusi o aperti), si combinano agli ottimi contributi dati dalla presenza dell'elemento isolante installato sul fronte murario, realizzando un sistema di isolamento "attivo", nell'accezione fornita precedentemente, capace di variare e adattare il proprio dinamicamente in funzione delle sollecitazioni esterne, al fine di ottimizzare l'efficienza energetica dell'involucro durante il regime estivo e invernale.

Durante il regime estivo, la maggior parte della radiazione solare incidente viene riflessa in misura variabile in funzione del coefficiente di assorbimento della superficie, mentre il calore che attraversa lo strato di rivestimento esterno attiva il movimento dell'aria all'interno dell'intercapedine, venendo parzialmente assorbito dalla parete per conduzione. Durante il regime invernale, invece, la temperatura della camera d'aria è paragonabile a quella dell'ambiente esterno e, pertanto, il movimento dell'aria diminuisce sensibilmente senza compromettere le prestazioni della parete.

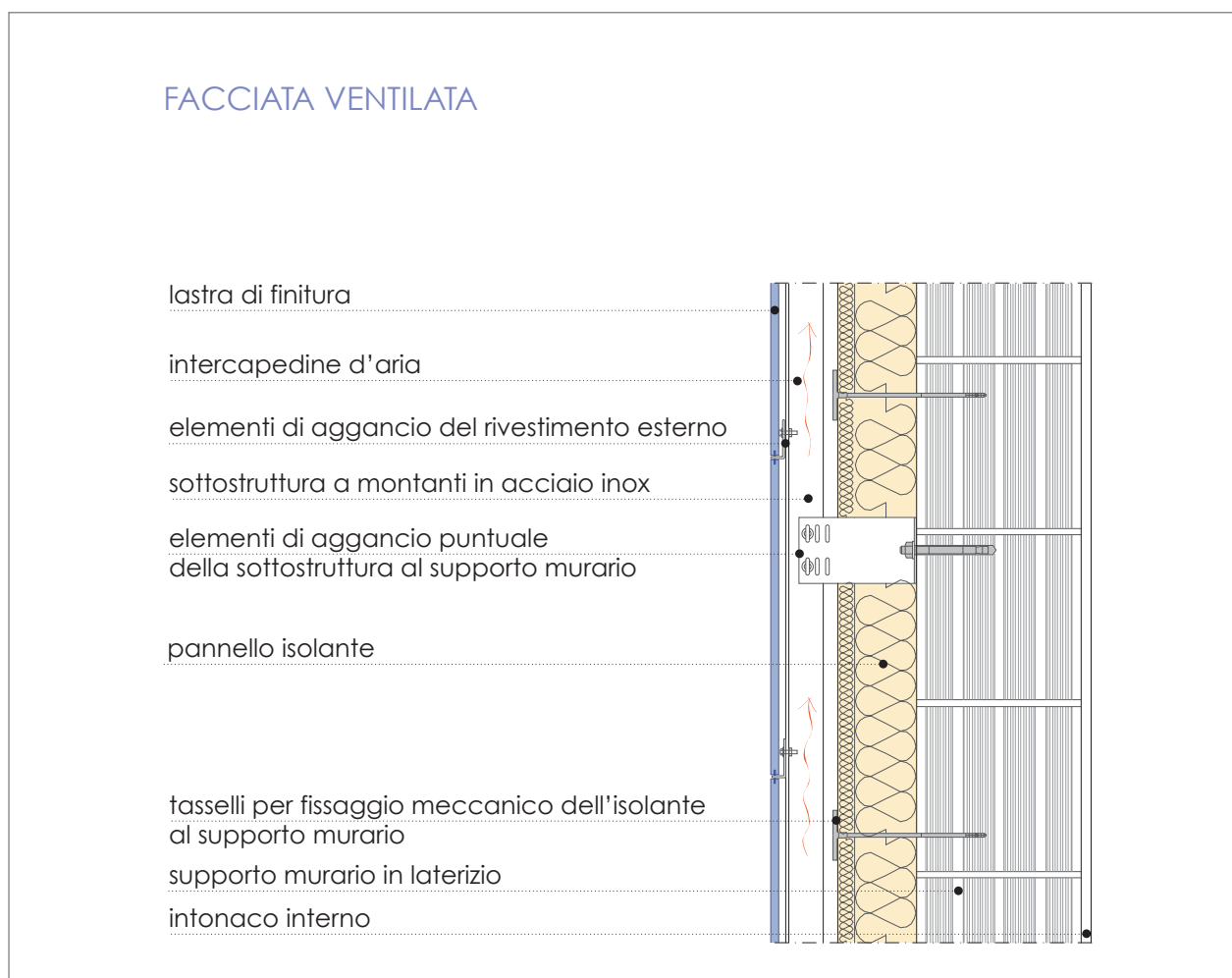
Il materiale isolante costituente lo strato coibente deve essere selezionato durante la fase progettuale, in funzione del contesto climatico, delle caratteristiche costruttive della facciata a cui deve essere abbinato e dei requisiti prestazionali ricercati. Da questa serie di fattori deriva la selezione del materiale termicamente isolante più adeguato, così come lo spessore del pannello necessario per rispondere alle esigenze imposte dalle attuali normative e dall'utenza. In ogni caso, l'isolante termico, essendo particolarmente esposto, in quanto posizionato all'esterno al fine di consentire un controllo dei ponti termici e delle condensazioni superficiali, deve essere resistente agli agenti esterni.

Poiché l'efficienza dell'isolamento termico deriva, oltre che dal dimensionamento dello strato isolante, anche dalla sua reale continuità e omogeneità lungo lo sviluppo di facciata, è indispensabile che, indipendentemente dal tipo di materiale utilizzato, esso sia posato prestando particolare cura verso l'accostamento preciso dei pannelli e lo sfasamento dei relativi giunti. Al fine di garantire l'assenza di eventuali lame d'aria formatesi tra l'isolante e gli elementi di supporto appartenenti alle strutture perimetrali, occorre curare lo sfalsamento dei giunti tra i pannelli coibentanti: nel caso di isolamento monostrato in una delle due direzioni del piano di facciata (generalmente in corrispondenza dei giunti verticali), mentre nel caso di isolamento pluristrato in entrambe le direzioni, o anche tra strato e strato.

Secondo le ricerche e le analisi numeriche svolte sui sistemi di facciata ventilata, si può affermare quindi che esso riesce ad attivare comportamenti termici differenti a seconda delle condizioni esterne, dunque alternativamente durante la stagione invernale ed estiva²². Durante il regime inver-

22 Lucchini A., *Conoscere più in dettaglio le pareti ventilate*, in "Costruire in laterizio", n. 113, Settembre/Ottobre

nale, una parete ventilata presenta prestazioni termiche effettive inferiori rispetto a quelle di una parete avente uguale stratificazione, ma caratterizzata da un'intercapedine perfettamente chiusa: la perdita prestazionale derivante da questo particolare costruttivo si aggrava progressivamente al crescere della portata dell'aria nell'intercapedine. In termini teorici, per tener conto di questa perdita, è opportuno incrementare lo spessore dell'isolante, risultante dal calcolo in condizioni termiche stazionarie di picco, considerando ferma l'aria all'interno dell'intercapedine, da un 2-4% per bassa ventilazione (pochi l/s.m²) a un 10-12% per alta ventilazione (centinaia di l/s.m²). In termini pratici, considerati gli spessori di isolante normalmente adottati per soddisfare la normativa di riferimento, questo accorgimento si traduce nella previsione di 1 cm di spessore aggiuntivo allo strato isolante, che in ogni caso non comporta particolari difficoltà tecniche o incrementi di costo.



[Fig. 9] Dettaglio costruttivo di un sistema tipo di facciata ventilata.

Il modello funzionale presentato dal sistema di facciata ventilata trova un largo impiego in quanto garantisce una vasta flessibilità di utilizzo, essendo applicabile sia alla pareti portanti sia a quelle non portanti, ed essendo impiegabile sia nella costruzione del nuovo, sia nella riqualificazione energetica ed architettonica del costruito. A questo proposito, risultano significativi i recenti provvedimenti legislativi atti a promuovere e favorire interventi di aumento volumetrico volti al miglioramento del comportamento energetico dell'edificio. Così come definito nella norma UNI 11018:2003, nei sistemi tecnologici di facciata ventilata "l'intercapedine tra il rivestimento e la parete è progettata in modo tale che l'aria in essa presente possa fluire per effetto camino in modo naturale e/o in modo artificialmente controllato, a seconda delle necessità stagionali e/o giornaliere, al fine di migliorarne le prestazioni termo-energetiche complessive".

La necessità di un'accurata progettazione dell'involucro degli edifici, volta a curare le qualità estetico-architettoniche e al contempo a curare il comportamento prestazionale energetico, conduce spesso alla scelta della soluzione della parete ventilata, considerata un sistema molto valido per il raggiungimento di questo obiettivo, specialmente per climi caratterizzati da elevate precipitazioni in presenza di vento e per climi caldi.

Queste riflessioni, legate a tale sistema costruttivo di facciata ampiamente adottato, hanno portato a condurre numerosi studi e ricerche, durante il corso degli ultimi anni, sulle pareti ventilate, dal punto di vista sia architettonico ed estetico-formale, sia prestazionale e fisico-tecnico, in termini di risparmi energetici conseguibili mediante l'impiego di tali strutture.

SHADING SCREEN

Il sistema Shading Screen prevede l'assemblaggio a secco di componenti di involucro in laterizio, sotto forma di lastre dotate di una superficie esterna corrugata, conformata in modo tale da ridurre l'assorbimento della radiazione solare e dunque contribuire al miglioramento prestazionale della facciata [Fig. 10].

Questo sistema appartiene alla categoria di involucri multistrato ventilati, a schermo avanzato, proponendo una composizione della facciata volta ad ottimizzare le prestazioni termiche dell'involucro edilizio. Il "pacchetto" di facciata è composto principalmente da due sistemi: lo strato isolante, assemblato a secco, posto nella parte più interna, e il sistema ventilato di chiusura esterna.

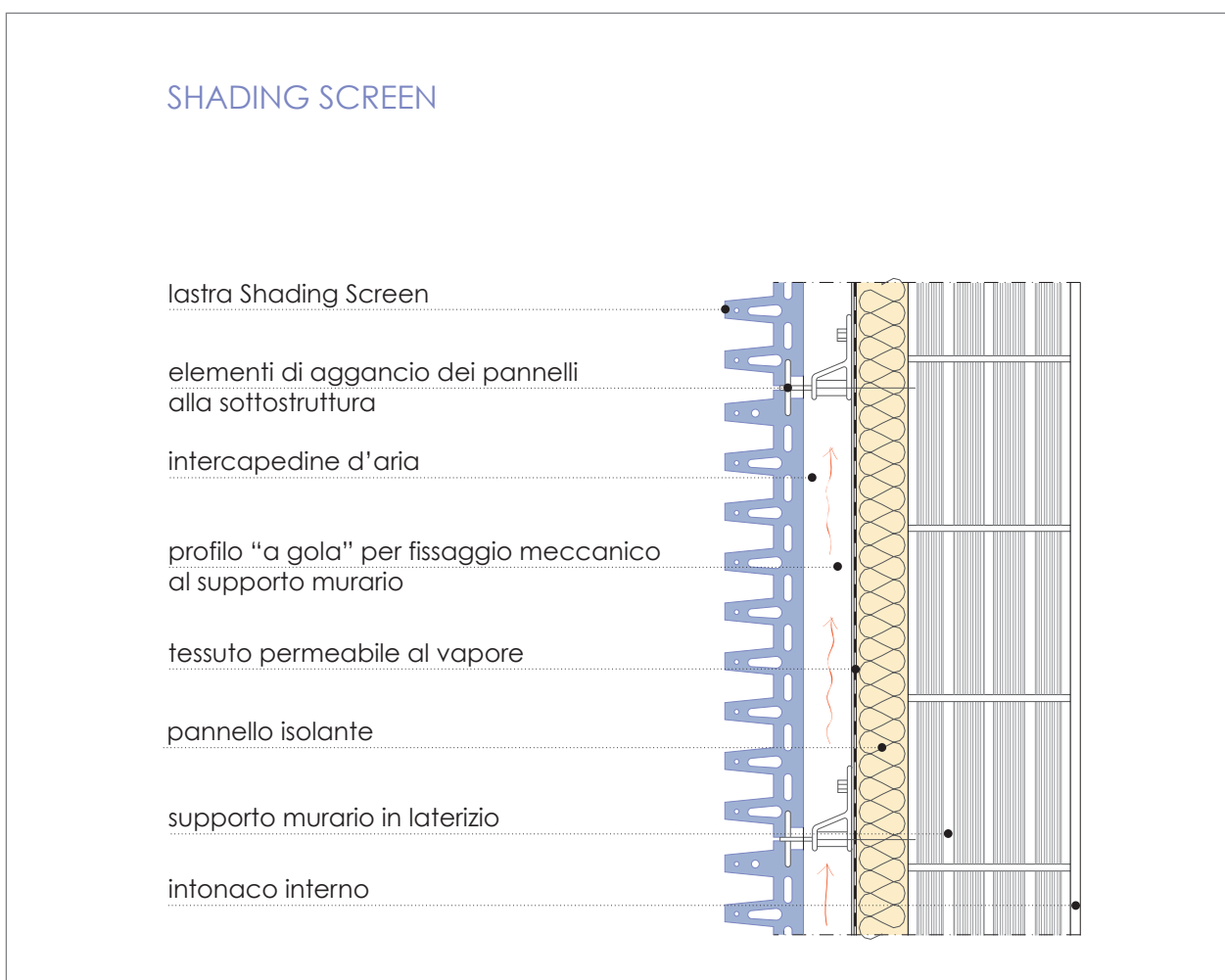
In particolare, la stratigrafia del muro perimetrale prevede la combinazione dei seguenti elementi:

- strato isolante (generalmente in lana di roccia);
- strato di regolazione;
- sottostruttura portante di supporto (costituita da montanti metallici);

- staffe a L di ancoraggio puntuale alla facciata;
- elementi di aggancio delle lastre alla sottostruttura;
- elementi accessori e giunti (cuscinetti distanziatori in PVC e perni per frangisole);
- strato di ventilazione;
- lastre estruse *Shading screen*;
- eventuali accessori aggiuntivi.

La particolare conformazione della lastra *Shading screen* nasce con lo scopo di realizzare un componente di rivestimento per facciate ventilate, che possieda intrinsecamente un sistema di auto-ombreggiamento, ottenuto tramite l'ottimizzazione della geometria della superficie esterna.

Le corrugazioni che caratterizzano le lastre consentono di ampliare notevolmente la superficie disperdente che, infatti, risulta 2,8 volte maggiore rispetto a quella di una tradizionale lastra di rivestimento di facciata, caratterizzata dalla superficie piana e regolare.



[Fig. 10] Dettaglio costruttivo di un sistema tipo di Shading Screen.

Al contempo, tale trattamento della superficie crea delle sporgenze capaci di generare ombre durante le ore calde della giornata, conferendo al sistema la capacità di contribuire notevolmente ad attenuare l'assorbimento di calore.

Inoltre, un fattore determinante in termini di miglioramento delle prestazioni termiche è rappresentato dalla scelta del colore: mentre le tonalità chiare hanno una maggiore riflessione e una minore capacità di assorbimento della radiazione solare, permettendo alla lastra di raffreddarsi più facilmente, i colori scuri presentano una capacità decisamente più elevata di assorbimento delle radiazioni solari, durante le ore calde del giorno e durante la stagione più calda.

Naturalmente, le dimensioni della lastra, e dunque anche l'ampiezza della superficie dispendente di facciata, incidono sui parametri termici che definiscono le caratteristiche dell'involucro.

Da queste considerazioni e dai risultati ottenuti dalla ricerche scientifiche finora condotte, si evince che la particolare geometria del sistema, abbinata a un modello tradizionale di parete ventilata, risulta efficace in termini energetici, contribuendo significativamente alla riduzione dell'assorbimento di energia solare.

Ciò che rende il sistema particolarmente efficiente consiste nella combinazione degli effetti termici benefici offerti dalla resistenza termica del laterizio, abbinati a quelli forniti dalla trama zigrinata della superficie esterna, capace di proiettare ombre sulla facciata, così come a quelli offerti dalla presenza di forature interne atte ad aumentare la resistenza al passaggio del calore.

In conclusione, il sistema *Shading screen* può risultare una soluzione valida per la realizzazione di componenti avanzati di involucro edilizio, da impiegare nei contesti climatici caratterizzati da un forte irraggiamento solare, così come nelle zone temperate.²³

FACCIATA CONTINUA A DOPPIA PELLE

La facciata continua a doppia pelle rappresenta un sistema di chiusura complesso, generalmente interamente vetrato, in cui due lastre di vetro racchiudono un'intercapedine d'aria posta davanti al sistema di chiusura vero e proprio dell'edificio. Si tratta di un sistema di involucro avanzato, generalmente valido per pareti esposte a sud, est e ovest, in grado di interagire attivamente con l'ambiente esterno, attuando un comportamento di tipo "dinamico" e variabile durante il regime estivo e invernale, grazie alla presenza di una camera di ventilazione.

Il sistema è costituito principalmente da tre elementi costruttivi:

²³ Il progetto di riqualificazione energetica della Scuola Media Dozza, presentato all'interno del *Capitolo V*, si basa su alcuni importanti principi bioclimatici, fra cui l'auto-ombreggiamento dei componenti di facciata. Infatti, i pannelli di rivestimento a trama esagonale in materiale polimerico, resistente e leggero, sono caratterizzati da nervature irrigidenti che, essendo dotate di profondità differenti, consentono di raggiungere un auto-ombreggiamento della facciata variabile, progettata in funzione delle connotazioni del fabbricato oggetto di intervento, oltre che di ottenere un disegno chiaroscurale suggestivo.

- strato vetrato esterno, dotato di bocchette di aerazione, a costituire lo strato di rivestimento volto a proteggere la parete dagli agenti climatici;
- intercapedine d'aria intermedia (spessore intorno ai 10-120 cm);
- strato vetrato più interno, dotato di aperture per l'immissione dell'aria negli ambienti interni, ai fini di regolare il microclima degli ambienti confinati, e di consentire l'ispezione e la manutenzione dell'intercapedine.

Pertanto, la facciata continua a doppia pelle si basa sul principio della facciata ventilata, da cui si differenzia per l'utilizzo di un rivestimento esterno costituito da specchiature vetrate. La sua particolare composizione permette di sfruttare l'intercapedine tra le due "pelli" trasparenti per migliorare l'isolamento acustico dell'involucro, e gestire la ventilazione degli ambienti interni, portando a un risparmio energetico annuale pari al 20% almeno, rispetto a una tradizionale facciata vetrata continua.

All'interno dell'intercapedine si attiva un sistema di ventilazione che può essere naturale o forzato. Nel primo caso, la facciata sfrutta il fenomeno dell'"effetto camino", basato sull'espulsione dell'aria calda mediante movimenti ascensionali e sull'aspirazione dell'aria fredda proveniente dalle aperture inferiori. Nel secondo caso, invece, qualora la ventilazione sia forzata, l'aria calda viene aspirata mediante impianti meccanici predisposti a integrazione dell'impianto di climatizzazione dell'edificio.

A volte, la facciata a doppia pelle viene integrata da passerelle interne che hanno la funzione di facilitare la manutenzione dell'involucro ed, eventualmente, di segmentare l'intercapedine in corridoi separati per gestire la ventilazione forzata in maniera distinta. Infatti, le ricerche condotte nel campo degli involucri avanzati continui a doppia pelle hanno portato ad elaborare varie declinazioni del sistema costruttivo di facciata, variabili per la compartimentazione dello spazio d'intercapedine confinato dalle due pareti vetrate: facciata a doppia pelle a tutta superficie (prive di qualsiasi suddivisione), a canali (scandite da suddivisioni verticali), a singoli elementi (scandite da suddivisioni verticali ed orizzontali).

Questo tipo di facciata permette di caratterizzare la pelle esterna mediante l'adozione di varie soluzioni per la realizzazione della sottostruttura di supporto delle lastre vetrate: secondo le scelte progettuali legate alle dimensioni delle lastre e al design architettonico, si può scegliere di impiegare telai metallici a montanti e traversi oppure, più semplicemente, strutture puntiformi costituite da montanti metallici e staffe, con sistemi di ancoraggio puntale tra i componenti di facciata e tra essi e la facciata esistente. Inoltre, il design architettonico della facciata può variare qualora venga prevista l'integrazione di elementi apribili nell'intercapedine interna, purché dotati di caratteristiche tali da non comportare ingombri che potrebbero ostacolare il corretto flusso dell'aria.

In conclusione, il sistema di facciata a doppia pelle costituisce un valido sistema di involucro

avanzato, ampiamente utilizzato tanto nel campo della riqualificazione energetica del costruito, quanto in quello della nuova costruzione. La possibilità offerta di accumulare calore durante il regime invernale e di proteggere l'ambiente dal surriscaldamento durante il regime estivo, abbinata alle benefiche conseguenze di una ventilazione all'interno dell'intercapedine, comporta un significativo miglioramento delle prestazioni energetiche e del comfort abitativo interno. Grazie alle sue caratteristiche, questo sistema consente di creare un vero e proprio schermo esterno, caratterizzato da un comportamento "attivo", nel senso di adattivo e variabile in funzione delle condizioni climatiche esterne.

MURO TROMBE-MICHEL

Tra le varie soluzioni di involucro che prevedono l'uso di vetrate, si trova anche il muro *Trombe-Michel*, costituito da un sistema di captazione della radiazione solare e di sfruttamento passivo dell'energia termica, che viene accumulata all'interno dell'intercapedine posta esternamente alla parete portante perimetrale. Il sistema si compone di un vetro esterno dotato di bocchette per la ventilazione, di un'intercapedine d'aria e di una parete opaca, capace di accumulare calore grazie alla sua massa termica, dotata di aperture poste alla base e in sommità, per la ventilazione dei locali interni, da aprire o chiudere a seconda delle stagioni.

Il muro *Trombe-Michel*²⁴ appartiene alla categoria dei sistemi solari a guadagno indiretto. Il sistema è costituito da un collettore di energia solare integrato nell'elemento di involucro edilizio, che consente di ricevere direttamente la radiazione solare, impedendone la penetrazione all'interno, per poi ricederla sotto forma di energia termica agli ambienti di accumulo, con un ritardo di alcune ore, variabile in funzione della stratigrafia dei materiali impiegati.

Affinché avvenga questo sfasamento termico, necessario per evitare il veloce surriscaldamento degli ambienti interni, il muro perimetrale al quale deve essere associato questo sistema deve presentare una massa elevata e dunque una elevata inerzia termica: pertanto, deve essere realizzato in muratura, pietra o calcestruzzo. Inoltre, affinché venga attivato il meccanismo di accumulazione termica, occorre che il muro sia esposto a sud e sia preferibilmente colorato con tonalità scure, e che sia rivestito da una lastra vetrata esterna posta a una distanza di almeno 8-10 cm, in modo tale da rendere possibili i moti convettivi e gli scambi termici.

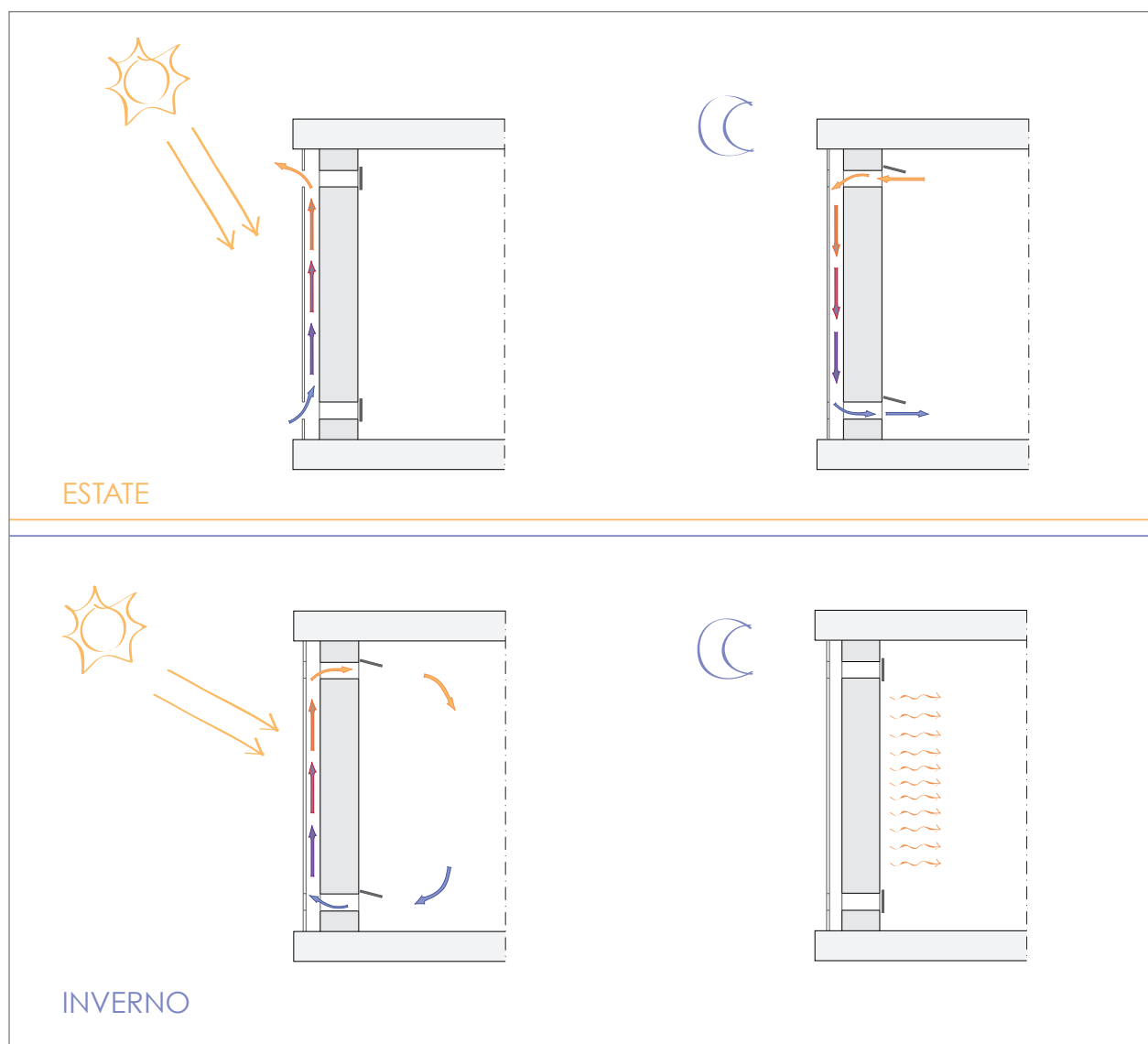
In generale, la radiazione solare che incide sulla superficie esterna vetrata viene captata e immagazzinata sotto forma di energia termica all'interno dell'intercapedine d'aria, provocando un significativo innalzamento della temperatura del muro. Questo calore viene ceduto all'ambiente in-

24 Il muro *Trombe-Michel*, brevettato nel 1881 da Edward Morse, è reso famoso nel 1964 dall'ingegnere francese Felix Trombe e dall'architetto Jacques Michel, che lo sperimentarono in una cittadina francese Odeillo, situata nei Pirenei.

terno parzialmente per conduzione attraverso la parete perimetrale, e parzialmente per convezione attraverso le aperture poste alla sua base e alla sua sommità, nei momenti in cui le aperture interne sono aperte (cioè durante le ore notturne estive e durante le ore diurne invernali).

Nel periodo estivo, durante le ore calde del giorno, le aperture poste sulla parete massiva vengono chiuse per impedire l'ingresso del calore all'interno degli ambienti, mentre le bocchette poste sulla vetrata esterna vengono aperte per consentire la circolazione dell'aria all'interno dell'intercapedine. Al contrario, durante le ore notturne, vengono aperte le bocchette interne per consentire all'aria di circolare e raffreddarsi a contatto con la vetrata, e vengono chiuse le aperture esterne.

Nel periodo invernale, durante le ore del giorno, le aperture poste sulla parete massiva interna vengono aperte per consentire l'aspirazione dell'aria fredda interna, accumulata in prossimità



[Fig. 11] Schema illustrativo del comportamento termico dinamico del muro di Trombe-Michel.

del pavimento, la quale si riscalda all'interno della camera, a contatto con la parete scura, per poi muoversi verso l'alto e rientrare nell'ambiente dall'apertura posta in sommità. Al contrario, durante le ore notturne, vengono chiuse le bocchette interne per impedire che l'aria interna riscaldata si raffreddi, entrando a contatto con la vetrata esterna a temperatura inferiore. [Fig. 11]

In analogia con il muro a doppia pelle, anche il muro *Trombe-Michel* riesce a garantire un comportamento energetico efficiente di tipo “dinamico”, in grado di rispondere tanto alle esigenze di accumulo di calore e riscaldamento durante la stagione invernale, quanto alle necessità di ventilazione e raffrescamento durante la stagione estiva. Infatti, in regime invernale, lo strato di aria interposto tra la parete perimetrale e lo strato vetrato funge da captatore di radiazione solare e accumulatore di calore, basato sullo sfruttamento dell'effetto serra delle pareti esposte a sud, mentre in regime estivo l'intercapedine d'aria funge da sistema di raffrescamento naturale, basato sullo sfruttamento della camera d'aria come camino solare.

In conclusione, le strategie bioclimatiche su cui si basa il muro *Trombe-Michel* rendono questo sistema un valido strumento per il controllo delle prestazioni energetiche degli edifici nuovi, oltre che una tecnica costruttiva efficiente per l'efficientamento energetico degli involucri edilizi.

FACCIATA IN VETRO STRUTTURALE

La facciata continua in vetro strutturale costituisce un sistema di involucro trasparente e leggero, dotato di ruolo autoportante, dunque privo di una sottostruttura di supporto continua, in quanto progettato per essere in grado di reggere il proprio peso e di trasferire i carichi del vento a una struttura metallica di controventamento, collocata sul piano retrostante, grazie a speciali sistemi di ancoraggio puntuali [Fig. 12].

Il sistema è formato da lastre multistrato di vetro, costituite da singoli strati assemblati tra loro mediante l'utilizzo di polimeri plastici o resine, a costituire pannelli vetrati di dimensioni variabili: secondo le ultime ricerche svolte in ambito scientifico, il materiale più idoneo per realizzare un unico materiale resistente risulta il polycarbonato, che garantisce un certo coefficiente di sicurezza in caso di urti, difetti di fabbricazione o peggioramento delle condizioni di esercizio. I singoli pannelli sono assemblati tra loro mediante l'utilizzo di giunti in silicone strutturale, senza necessitare di una sottostruttura metallica di supporto, rendendo la struttura vetrata più continua e leggera.

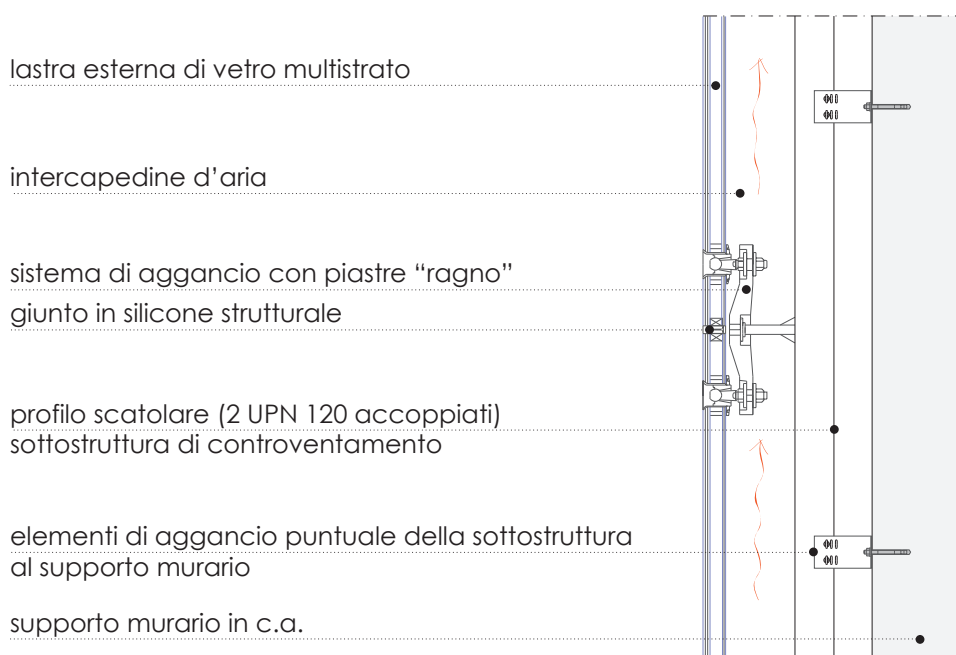
In quest'ottica, la facciata continua in vetro strutturale costituisce un sistema di involucro avanzato rispetto alla tradizionale facciata continua, nato proprio dalla volontà di trovare una soluzione per rendere il meno visibile possibile il sistema di ancoraggio delle lastre vetrate, assemblate in un sistema indipendente e autoportante.

Oltre a contribuire in maniera determinante alla definizione dell'identità estetico-architettonica dell'edificio, la facciata in vetro strutturale rappresenta un sistema in grado di regolare la

trasmissione dei flussi energetici tra interno ed esterno, determinando profondamente il comfort interno agli spazi abitativi.

Infatti, la riduzione al minimo della dimensione delle fughe tra i pannelli e l'occultamento dei profili metallici per la connessione e l'ancoraggio producono effetti positivi non soltanto sulla pulizia estetica e formale dei volumi, ma anche sul comportamento termico dell'involucro edilizio. La riduzione di punti di discontinuità e la massimizzazione della regolarità in superficie, rese possibili dall'affidamento della connessione tra i pannelli mediante giunti in silicone strutturale, contribuiscono significativamente alla riduzione della trasmissione del calore e della formazione di ponti termici. Al silicone strutturale (*structural glazing*) sono interamente affidate le proprietà di resistenza meccanica agli sforzi di taglio e a quelli derivati dalla pressione e depressione del vento, mentre parte del peso proprio delle lastre vetrate è affidato a piccoli elementi metallici orizzontali leggermente sporgenti (chiamati "manine"), in grado di compensare l'eventuale cedimento del silicone strutturale lungo il perimetro della lastra.

FACCIATA IN VETRO STRUTTURALE



[Fig. 12] Dettaglio costruttivo di una facciata ventilata tipo.

Le maggiori problematiche da affrontare durante la progettazione di una facciata continua in vetro strutturale riguardano la resistenza alle sollecitazioni meccaniche esterne, quali la spinta del vento, le cui sollecitazioni orizzontali possono innescare importanti fenomeni di distacco in corrispondenza dei giunti, con conseguente possibilità di infiltrazione dell'aria e dell'acqua. Nei sistemi di facciata continua, la tenuta all'aria e all'acqua è affidata principalmente ai sigillanti e alle guarnizioni poste tra le lastre vetrate che, se prive di caratteristiche strutturali, sono sensibili a rottura.

Un'ulteriore criticità da affrontare riguarda infatti le proprietà legate alla protezione dagli agenti atmosferici, quali la tenuta all'acqua e la stabilità sotto variazioni di temperatura: essendo costituite da materiali caratterizzati da elevati coefficienti di dilatazione e da limitata capacità termica, le facciate continue vetrate sono molto sensibili nei confronti delle variazioni di temperatura.

I pannelli possono dunque essere soggetti a dilatazioni e contrazioni nelle due direzioni principali, oltre che presentare eventuali incurvamenti in corrispondenza del loro piano medio. Oltre a tutte queste considerazioni, occorre rilevare anche gli aspetti critici legati alla difficile manutenibilità e sostituibilità degli elementi in caso di degradi e guasti. Questo sistema di facciata, ampiamente diffuso fin dagli anni Cinquanta, viene impiegato sia nella nuova costruzione, sia negli interventi di recupero e riqualificazione del costruito, grazie alle proprietà offerte dalla superficie vetrata multistrato - se definita da una scelta sapiente del tipo di vetro basso-emissivo e riflettente - di regolare la radiazione solare e il comfort interno, riducendo i consumi energetici.

INVOLUCRO MASSIVO STRUTTURALE

L'involucro massivo rappresenta un sistema tradizionale di facciata, specialmente nell'architettura mediterranea, costituito da una facciata portante, generalmente in laterizio, pietra o calcestruzzo, dotata di un ottimo comportamento prestazionale energetico basato sullo sfruttamento delle proprietà di inerzia termica per il regolamento dell'equilibrio igrotermico e del benessere abitativo [Fig. 13].

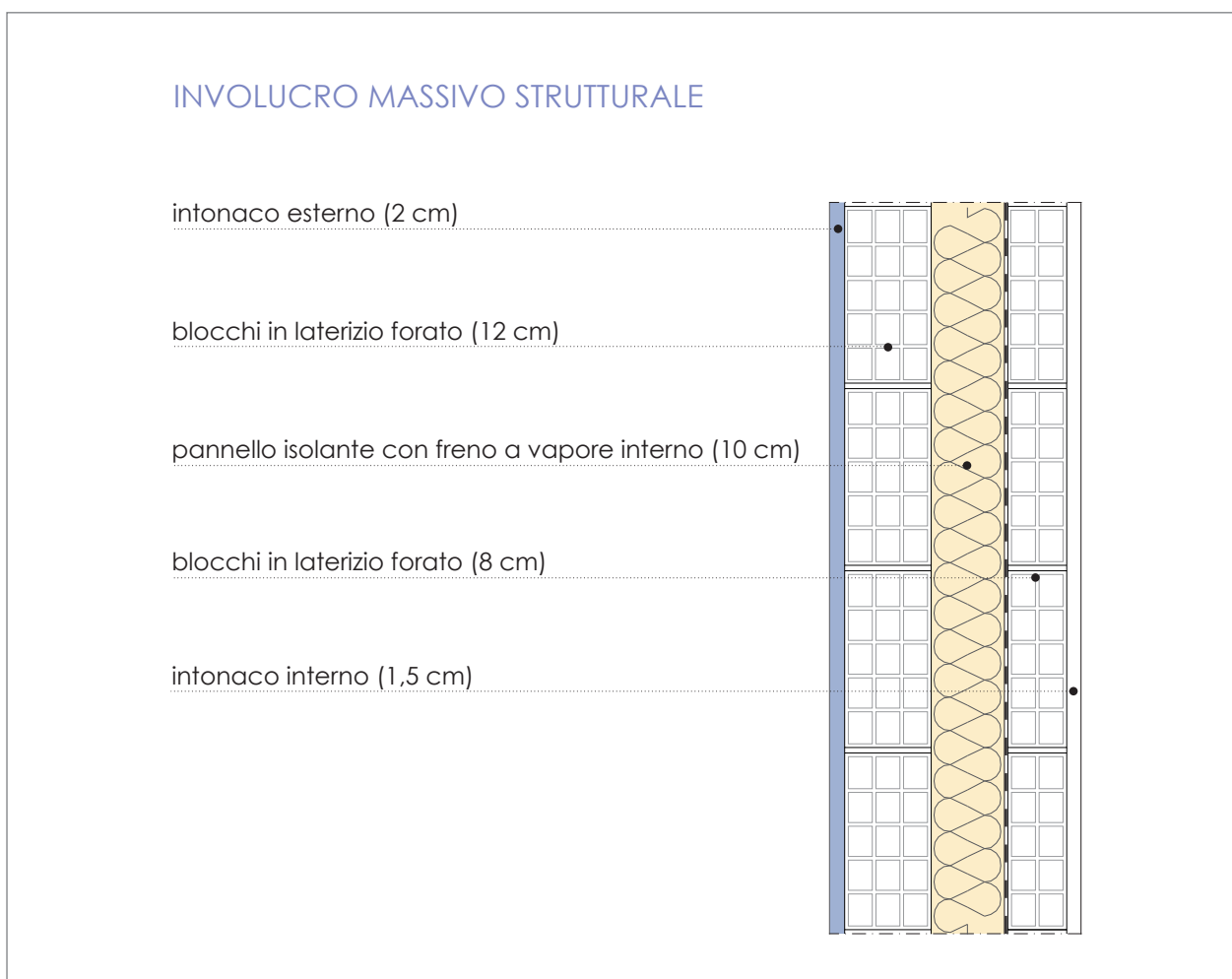
I climi temperati, come quello mediterraneo, impongono esigenze di regolazione termica diverse da quelle di altri paesi caratterizzati da climi continentali, facendo emergere la necessità di un sistema di involucro a comportamento "dinamico", in grado di garantire un equilibrio igrotermico e un comfort interno costante durante l'alternarsi delle forti oscillazioni climatiche invernali ed estive.

Per far fronte a questa problematica, occorre affrontare la progettazione dell'involucro edilizio considerando anche le sue proprietà dinamiche, al fine di realizzare un sistema di facciata "intelligente", che interagisca con l'ambiente circostante, autoregolandosi in funzione dei forti cambiamenti climatici. In quest'ottica, assumono grande importanza i due fattori che determinano le prestazioni termiche di un involucro: l'effetto di *smorzamento* dell'onda termica proveniente

dall'esterno, legato all'isolamento termico, e l'effetto di *sfasamento*, legato all'inerzia termica.

L'inerzia termica rappresenta la capacità di attenuare le oscillazioni della temperatura ambiente, dovuta ai carichi termici interni ed esterni variabili durante la giornata, e di accumulare il calore per rilasciarlo gradualmente con un determinato sfasamento. Essa, dunque, contribuisce a ritardare il tempo intercorrente tra l'impatto dell'onda termica sulla superficie esterna e il suo apparire sulla faccia interna, con intensità esterna, generando così significative ripercussioni sulle prestazioni energetiche complessive dell'involucro, sia in inverno che in estate.

L'inerzia termica rappresenta una proprietà fondamentale per la definizione delle capacità prestazionali dell'involucro edilizio, così come la trasmittanza termica U ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), ma a differenza di quest'ultima risulta strettamente legata alla massa superficiale della parete: il calore dovrà riscaldare tutta la massa della partizione esterna prima di passare, pertanto si ha un ritardo del fenomeno tanto maggiore quanto maggiore è la massa. Essa costituisce un fattore importante per il comfort abitativo e il benessere termoigrometrico, conferendo grande regolarità all'involucro e



[Fig. 13] Dettaglio costruttivo di un involucro massivo strutturale tipo.

attenuando la presenza di sbalzi termici: infatti, l'involucro massivo - se bene progettato - agisce come filtro termoregolatore e funziona come "volano termico", sia d'inverno che d'estate, preservando la temperatura media radiante e procurando una sensazione di benessere abitativo.

L'importanza del ruolo della massa, quindi, appare evidente in un'ottica sostenibile volta al mantenimento della temperatura media e degli impianti a basse temperature di regime, e dunque al raggiungimento del benessere termoigrometrico e al contenimento dei consumi energetici.

A differenza di quanto esposto all'inizio del presente capitolo in merito all'attuale tendenza volta alla progettazione di involucri edilizi leggeri assemblati a secco, dunque reversibili e facilmente smontabili, si nota un ritorno, seppur limitato, all'utilizzo dell'involucro massivo che, se visto in un'ottica di sostenibilità, può rappresentare un segno di accorta innovatività.

Occorre tenere sempre presente la varietà di soluzioni esistenti valide per ottenere sistemi di involucro performanti, declinate in funzione del clima, delle scelte progettuali e delle esigenze richieste dall'utenza e dalla normativa attuale.

L'impiego di un sistema massivo portante comporta l'inevitabile compattezza dell'edificio, rappresentata da un elevato rapporto tra superficie e volume (S/V), da una ridotta presenza di discontinuità geometriche in facciata, e da una elevata consistenza delle murature perimetrali: tutti questi fattori comportano una maggiore efficienza energetica, perseguita mediante la selezione di materiali dotati di un elevato coefficiente di inerzia termica.

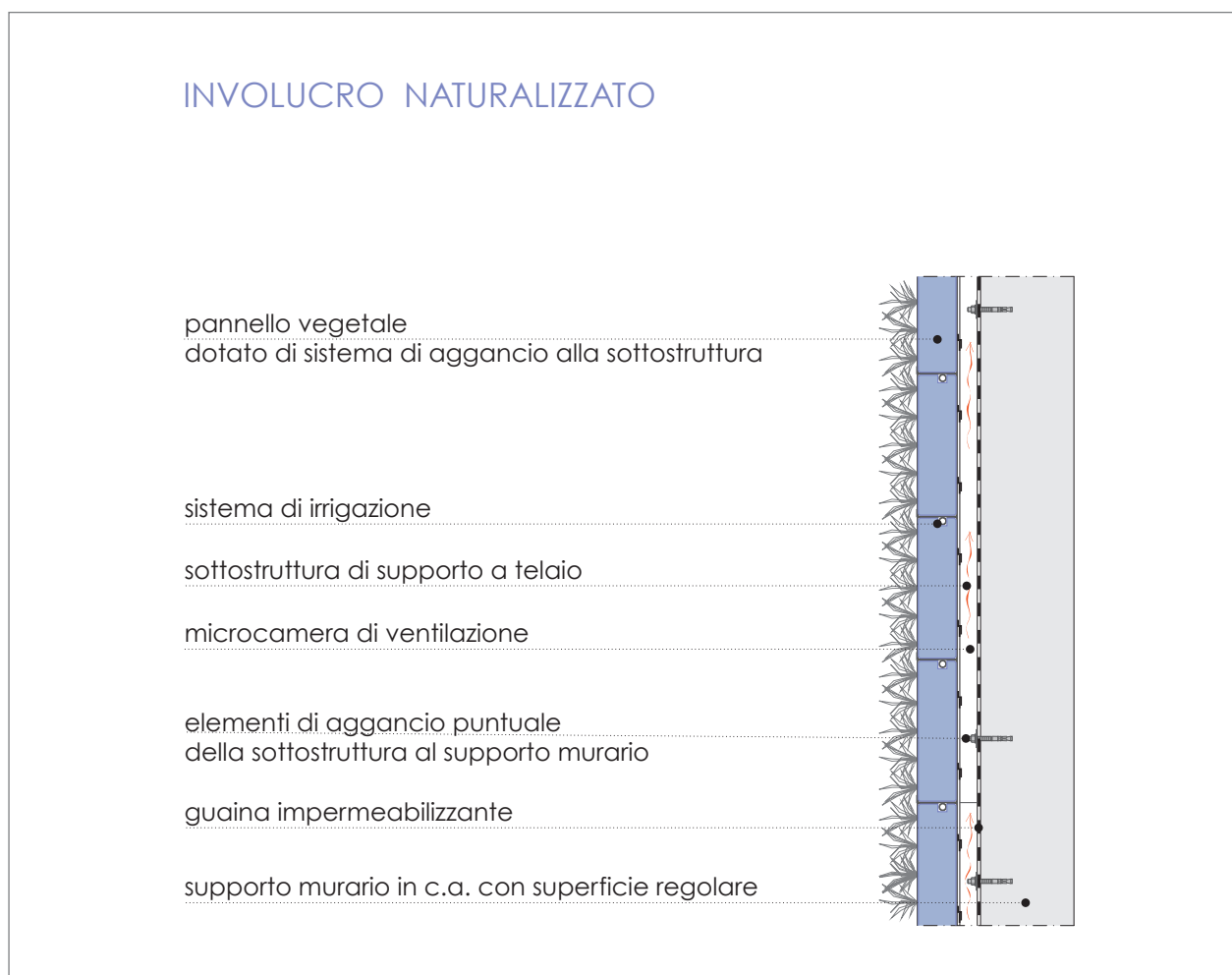
La configurazione massiva consente di utilizzare materiali minerali naturali (laterizio e pietra), il cui grado di sostenibilità, rispetto al ciclo di vita, risulta superiore a quello di altri materiali innovativi, generalmente artificiali, leggeri, efficienti e trasparenti. In conclusione, si può dire che, a parità di condizioni, un edificio a involucro massivo analizzato secondo un modello dinamico di utilizzo, cioè durante un arco giornaliero o stagionale di tempo, comporta un fabbisogno energetico per riscaldamento e raffrescamento notevolmente inferiore rispetto a quello di altre tipologie edilizie.

Da questo insieme di riflessioni nasce l'idea di proporre un sistema di recupero ed efficientamento dell'involucro esistente mediante la giustapposizione di una seconda pelle massiva, di rivestimento per la facciata esistente di fabbricati realizzati nella seconda metà del Novecento, mediante l'assemblaggio di pannelli prefabbricati in conglomerato cementizio armato. Come verrà illustrato all'interno del *Capitolo III*, uno dei due sistemi di involucro proposti prevede la realizzazione di un paramento esterno costituito da cubi autobloccanti *TIM (Topologically Interlocked Materials)*, realizzati in materiale cibente/massivo (geopolimero a base ceramica proposto), per migliorare le prestazioni termiche degli edifici oggetto di studio mediante lo sfruttamento dell'inerzia termica propria di questo strato esterno. Ulteriori ricerche e analisi sviluppabili in futuro possono dimostrare, anche quantitativamente, il miglioramento prestazionale conseguibile mediante l'adozione di questa soluzione costruttiva di involucro.

INVOLUCRO NATURALIZZATO

L'utilizzo di elementi vegetali in architettura, a integrazione dei tradizionali elementi architettonici, risale all'antichità, quando già nei primi secoli del grande Impero Romano venivano utilizzate pergole verdi per coprire o proteggere gli edifici. Nel corso del tempo viene svolto un progressivo studio e approfondimento di questa strategia bioclimatica, formalizzato anche sotto forma di testi e manuali, che ha visto uno sviluppo sempre maggiore grazie alle attuali esigenze di ricorrere a strategie sostenibili di raffrescamento, finalizzate alla riduzione del consumo di energia.

In quest'ottica, durante gli ultimi anni, si sono sviluppate e affinate progressivamente tecniche innovative di rivestimento architettonico vegetale, integrate fra le scelte progettuali dei fabbricati con lo scopo di ottenere una riduzione effettiva della superficie di involucro, un'azione benefica di schermatura solare e ombreggiamento della facciata, una produzione di ossigeno e di acqua mediante fotosintesi clorofilliana, e dunque un raffrescamento dell'aria circostante al fine



[Fig. 14] Dettaglio costruttivo di un involucro naturalizzato tipo.

del raggiungimento di un derivato benessere abitativo.

Infatti, oltre al non trascurabile carattere estetico-architettonico offerto dalla presenza di vegetazione in architettura, tanto in facciata quanto in copertura, i rivestimenti vegetali rivestono l'importante ruolo di captatore della radiazione solare, con un'azione positiva significativa in merito alla riduzione del flusso incidente sulle superfici di involucro degli edifici.

Naturalmente, in base all'orientamento della facciata, al clima e alle esigenze dell'utenza, occorre scegliere la specie vegetativa più idonea, che può variare da piante rampicanti a decumbenti, da piante sempreverdi a piante caduche.

Sulla base della pianta scelta e della tipologia costruttiva del fabbricato oggetto del rivestimento vegetale, occorre scegliere poi il supporto più idoneo, sia in termini di effetti climatici benefici dello strato verde, sia in termini di compatibilità e interazione con il supporto sottostante.

Le piante rampicanti, ad esempio, possono infatti essere aggrappate direttamente alla muratura, oppure possono essere vincolate a una struttura sottostante, formata da una doppia parete costituita da un reticolo di cavi tesi in acciaio.

In alternativa, per le piante non rampicanti, è possibile prevedere il loro alloggiamento all'interno degli interstizi lasciati tra i mattoni costituenti la muratura di facciata, assemblati con giunti di malta. Inoltre, un'altra possibile soluzione prevede la realizzazione di uno strato verde che non aderisca direttamente alla facciata, alloggiando le piante all'interno di appositi cuscini (generalmente in feltro di poliammide), fissata a pannelli di PVC espanso connessi con la struttura metallica di supporto, ancorata alla facciata portante in modo tale da lasciare un'intercapedine d'aria di isolamento termico [Fig. 14].

Infine, un'ultima soluzione ibrida di muro verde prevede la disposizione di piante all'interno dell'intercapedine propria del sistema a doppia facciata vetrata, a costituire una sorta di serra filtrante e termoregolante per il controllo degli apporti solari.

Tra i sistemi di riqualificazione architettonica ed energetica dell'involucro edilizio, è quindi possibile annoverare anche la predisposizione di un involucro naturalizzato, seppur limitatamente adottato, in quanto spesso difficilmente accessibile in termini economici e applicativi.

I.2.3 MATERIALI INNOVATIVI PER UN EFFICIENTAMENTO ENERGETICO ECOSOSTENIBILE

La sintesi riportata in questo testo cerca di rappresentare al meglio - con la consapevolezza di non essere totalmente esaustiva - lo stato dell'arte delle ricerche svolte in ambito di chimica e tecnologia dei materiali da costruzione, classificando i materiali innovativi investigati e studiati finora, in relazione alle differenti possibili applicazioni.

Tra le varie classificazioni che si potrebbero attuare dei materiali da costruzione, si sceglie di procedere all'individuazione di categorie definite sulla base delle cinque diverse origini materiche:

- vegetale;
- minerale;
- animale;
- sintetica;
- composita.

All'interno del precedente paragrafo si è prefigurato un quadro descrittivo dello stato dell'arte delle soluzioni tecnologiche per il recupero dell'involucro che, come esposto sopra, risulta essere sempre più volto a rispondere alle sollecitazioni esterne mediante l'assunzione di un comportamento "attivo", dinamico e adattivo. Grazie all'evoluzione compiuta nel campo delle tecniche costruttive e dei materiali da costruzione, gli involucri edilizi attualmente progettati sono in grado di controllare i flussi energetici secondo un comportamento dinamico.

L'innovazione raggiunta mediante l'uso di nuove tecniche e metodi volge principalmente ad ottimizzare il benessere abitativo interno e a massimizzare l'efficienza energetica degli edifici, in termini di efficientamento delle prestazioni e di riduzione dei consumi. In questo senso, si comprende come sia fondamentale partire da un'analisi critica e sperimentale delle proprietà fisiche dei materiali innovativi ecocompatibili, in rapporto anche alle loro modalità di impiego e posa in opera, così come alla loro capacità di offrire un controllo efficiente delle sollecitazioni esterne, prima fra tutte la radiazione solare.

Per isolante termico, si intende un materiale in grado di mantenere costanti le condizioni climatiche interne all'edificio, indipendentemente dalle oscillazioni climatiche esterne, grazie alle sue proprietà termoisolanti, valutate in termini di *coefficiente di conducibilità termica* λ (mai superiore a 0,10 W/m.K) e di *trasmissione termica* U (o *capacità isolante*) (mai superiore a 0,5 W/m².K), che dipende da λ e dallo spessore.

Inoltre, tra le altre caratteristiche che dovrebbero presentare i materiali isolanti, figurano: buon grado di impermeabilizzazione (in funzione dell'applicazione), buona traspirabilità al vapore per un efficace controllo igrotermico degli ambienti interni, buona resistenza all'attacco biologico (muffe, funghi, insetti), buona resistenza al fuoco, neutralità elettrica, radioattività nulla, nocività e

dannosità per la salute nulle, ecosostenibilità, riciclabilità e ridotto impatto ambientale.

Infine, durante la progettazione dell'involucro edilizio, risulta fondamentale rivolgere grande attenzione non soltanto alle proprietà fisiche dei materiali selezionati, bensì anche all'esposizione alla radiazione solare e alle modalità di diffusione del calore da essa proveniente, in termini sia di sfruttamento dell'energia solare passiva, sia di illuminazione naturale. Infatti, occorre considerare i fenomeni di irraggiamento solare diretto, di diffrazione e rifrazione della radiazione solare, di assorbimento, diffusione e accumulo del calore, di conduzione e convezione dell'energia termica.

MATERIALI DI ORIGINE VEGETALE

Gli isolanti appartenenti alla famiglia dei materiali di origine vegetale derivano dalla lavorazione di materie provenienti da piante, alberi e altri elementi vegetali, nel rispetto massimo dei requisiti di sostenibilità naturale.

All'interno di questa categoria di isolanti termici, i materiali possono essere classificati ulteriormente, in funzione del prodotto che deriva dalla loro lavorazione:

1. **Particelle e fibre sfuse** per il riempimento di intercapedini, di parete e copertura, eventualmente contenute all'interno di sacchi o altri materiali di contenimento:
 - *fibre di canapa*, derivate dal processo di estrazione delle fibre dalla pianta di Cannabis sativa, che vengono pulite dalle impurità, aperte e pressate, e confezionate in balle;
 - *floccato di fibre di cellulosa*, derivate dal processo di lavorazione delle fibre di cellulosa, estratte dalle piante di lino, cotone, canapa o da alberi di pioppo, betulla, abete, o ancora dal riciclo di carta, che vengono battute e trattate meccanicamente in appositi mulini al fine di ottenere i fiocchi;
 - *fiocchi di fibra di juta*, proveniente dal processo di lavorazione del fusto delle piante malvacee di Corchorus capsularis e Corchorus olitorius, le cui fibre vengono estratte e trattate secondo un processo di macerazione, battitura, separazione ed essiccazione, per ottenere dei fiocchi;
 - *granuli di sughero*, derivati dal processo di lavorazione della corteccia della quercia da sughero, che viene estratta, trattata e tritata al fine di ottenere un granulato di dimensioni variabili, idoneo per essere insufflato a secco all'interno di intercapedini.
2. **Lastre e pannelli**, ottenuti dall'assemblaggio di fibre vegetali, intere o sminuzzate, pressate o amalgamate all'interno di una miscela con additivi:
 - *lastre e pannelli in fibra di cocco*, derivata dal processo di lavorazione delle fibre estratte dalla palma di Coccus nucifera, sottoposte a macerazione, cardatura, lavaggio, essiccazione e pettinatura;
 - *pannelli di floccato di cellulosa*, derivate dal processo di lavorazione delle fibre di cellulosa (estratte dalle piante di lino, cotone, canapa o da alberi di pioppo, betulla, abete, o ancora dal riciclo di carta), che vengono trattate meccanicamente in appositi mulini al fine di ottenere i fiocchi da pressare e legare con fibra sintetica in poliestere;
 - *pannelli di fibra di legno* (rigidi, semirigidi e morbidi), derivati dalla lavorazione degli scarti di legno di alberi (abete, pino, castagno, rovere, faggio) sottoposti a un processo di macinatura e sfibratura per ottenere le fibre, infine compresse ed essiccate sotto forma di pannelli;

- *pannelli di fibra di legno pressate con l'aggiunta di leganti*, naturali (lignina) o sintetici (resine fenoliche e ureiche);
- *pannelli di fibra di legno (tipo "Celenit")*, costituiti da una miscela di fibra di legno, fibra di poliolefina, fosfato di ammonio e agenti idrorepellenti, legate fra loro mediante collanti termoindurenti;
- *pannelli mineralizzati di fibra o lana di legno*, derivati da un processo di lavorazione della lana o della fibra di legno pressata e unita a leganti minerali (gesso, magnesite, cemento bianco o Portland) che conferiscono resistenza meccanica;
- *pannelli di granuli di sughero*, derivati dalla lavorazione del sughero granulare (sughero "biondo") sottoposto a un trattamento di pulitura dalle scorie legnose e di riscaldamento in forni anaerobici, durante il quale i granuli si gonfiano e si saldano naturalmente grazie alla suberina contenuta nel sughero, a costituire pannelli che infine, una volta raffreddati, vengono sottoposti a un compattamento meccanico;
- *pannelli in sughero (tipo "Celenit")*, derivati da un processo di lavorazione analogo del granulato di sughero, con aggiunta di biocolle come legante per i granuli, a costituire un pannello complessato mediante trattamento meccanico;
- *pannelli di fibra di kenaf*, derivati dal processo di lavorazione del fusto della pianta malvacea *Hibiscus cannabinus*, sottoposta a macerazione senza aggiunta di enzimi o acceleratori, e successivamente a sfibratura per ottenere le fibre che vengono termofissate con piccola aggiunta di poliestere riciclabile;
- *pannelli di fibra di mais*, derivati dalla lavorazione delle pannocchie di mais, sottoposte a fermentazione controllata per l'estrazione del polimero dell'acido polilattico PLA, sottoposto a un trattamento di estrusione e successiva filatura per ottenere fibre interamente biodegradabili, assemblate e compattate per formare pannelli termoisolanti.

3. **Rotoli e materassini** di fibre vegetali:

- *rotoli di fibra di canapa*, ottenuti dalla lavorazione delle fibre estratte dalla pianta *Cannabis sativa*, assemblate senza aggiunta di additivi o, talvolta, legate mediante fibre di poliestere di origine sintetica;
- *rotoli di canna palustre*, derivati dal semplice e breve processo di mietitura e pulitura dal fogliame dei fusti di canna, successivamente assemblati mediante sottile filo di ferro, a costituire rotoli monodirezionali o pannelli;
- *rotoli e materassini mineralizzati in fibra o lana di legno*, derivati da un processo di lavorazione della lana o della fibra di legno, pressata e unita a leganti minerali (gesso, magnesite, cemento bianco o Portland) che conferiscono resistenza meccanica;
- *rotoli a base di fibre intrecciate di kenaf*, derivati dal processo di lavorazione delle fibre di

kenaf, sottoposte a un trattamento di termofissaggio mediante una piccola aggiunta di poliestere riciclabile;

- *materassini in fibra di lino*, derivati dalla lavorazione della fibra di lino, con aggiunta di una piccola percentuale di collante naturale (amido di patate) e di sali di boro per la difesa contro l'attacco biologico e fungino.

MATERIALI DI ORIGINE MINERALE

Gli isolanti appartenenti alla famiglia dei materiali di origine minerale derivano dalla lavorazione di materie inorganiche, cioè definite da una composizione chimica ben precisa e priva di carbonio, costituenti la crosta terrestre.

In analogia con la classificazione proposta per gli altri materiali, all'interno di questa categoria di isolanti termici, i materiali possono essere suddivisi per classi, in funzione del prodotto che deriva dalla loro lavorazione:

1. **Particelle e granuli sfusi espansi** per il riempimento di intercapedini, di parete e copertura, eventualmente contenute all'interno di sacchi o altri materiali di contenimento:
 - *granuli di argilla espansa*, proveniente dall'estrazione dalla cava di roccia sedimentaria ricca di silicati idrati, posata a secco per insufflaggio all'interno di intercapedini;
 - *granuli di perlite espansa*, proveniente dall'estrazione di un tipo di roccia vulcanica effusiva (costituita da silicato di alluminio contenente biossido di silicio e un 2-6% di acqua), macinata, seccata ed espansa ad alte temperature. Con l'aggiunta di un additivo a base di silicone, si ottengono granuli di perlite espansa idrorepellente;
 - *granuli di vermiculite espansa*, proveniente dall'estrazione di un tipo di roccia vulcanica appartenente ai fillosilicati (costituita da ossidi di silice, magnesio, alluminio, calcio e un 5% di acqua), frantumata, essiccata in forni ad aria calda, macinata e sottoposta a un trattamento termico ad alta temperatura;
 - *fibre sfuse di lana di roccia*, derivata da silicati quali quarzo, dolomite, e nitrato di sodio (costituiti principalmente da silicio e ossigeno), che vengono fusi e miscelati in forni a carbone ed energia elettrica ad alte temperature, e addizionati con oli e resine con funzione di legante, per poi essere centrifugati per ottenere le fibre;
 - *fibre sfuse di lana di vetro*, derivata da silicati, soda, sabbia e pietre calcaree, o da vetro riciclato, che vengono mescolati in una vasca riscaldata elettricamente, fuse ad alta temperatura fino a ottenere una massa liquida, per poi essere centrifugata o insufflata di getti violenti d'aria al fine di ottenere le fibre;
 - *granuli di vetro riciclato*, composti per l'80% da sfridi provenienti da rifiuti a base di vetro, e ricavati da infusione di bottiglie di vetro, o da lana di vetro riciclata dalla demolizione edilizia.
2. **Lastre e pannelli** per il rivestimento interno o esterno di pareti e coperture:
 - *pannelli di perlite espansa (tipo "Peralit")*, ottenuti miscelando granuli di perlite espansa con cemento;

- *pannelli di argilla espansa*, ottenuti miscelando granuli o frantumi di argilla espansa con altri materiali (come sabbia, calce, cemento);
- *pannelli di vermiculite espansa*, ottenuti miscelando granuli di vermiculite espansa all'interno di impasti di calcestruzzo;
- *pannelli di vetro granulare espanso (tipo "Foamglas")*, costituiti per due terzi da vetro proveniente dal riciclo di vetro per automobili, per serramenti e tubi per lampade;
- *pannelli di vetro cellulare espanso*, ottenuti dal trattamento termico ad alte temperature del vetro cellulare espanso (composto da silice, quarzo, carbonato di calcio o di potassio, acido borico e altri minerali borici, ed eventualmente scarti di vetro), che trasforma il materiale in una schiuma alveolare rigida di colore scuro, pronta per essere tagliata in pannelli di varie dimensioni. Essendo un materiale a porosità chiusa, dotato di un coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ infinito, viene tradizionalmente impiegato per realizzare la prima fascia alla base del sistema di isolamento a cappotto esterno, per garantire l'impermeabilità contro la risalita dell'acqua dal suolo, seguita poi da un rivestimento costituito da un altro materiale isolante più economico, a porosità aperta o chiusa;
- *lastre e pannelli di calcio silicato*, realizzati a partire da sabbie silicee, miscelate con calce idraulica e una piccola percentuale di cellulosa con funzione di rinforzo;
- *lastre e pannelli di lana di roccia*, costituiti da un tappeto di fibre di lana di roccia tenute insieme da materiali che possono fungere anche da barriera al vapore, come la carta nera Kraft, la carta alluminata retinata e rinforzata, o più semplicemente una rete metallica;
- *lastre e pannelli di lana di vetro*, costituiti da un tappeto di fibre di vetro tenute insieme da materiali che possono fungere anche da barriera al vapore, come la carta bitumata o catramata, la carta Kraft, la carta in alluminio;
- *lastre e pannelli di calcestruzzo cellulare ("Foamcem")*, ottenuti dalla miscela di una boiacca di cemento con una schiuma aerante a base proteica, ottenuta mediante legante schiumogeno Foamcem, al fine di ottenere un impasto cementizio leggero e resistente, costituito da cellule di aria chiuse ad alto potere isolante;
- *pannelli a base di granuli di vetro riciclato*, ottenuti miscelando i granuli di vetro riciclato con gesso, cemento o resine a matrice silicica;
- *pannelli di silicato di calcio idrato ("Multipor")*, a base di idrati di silicato di calcio, calce, sabbia, cemento, acqua, additivi porizzanti (porosità 95%), realizzato mediante un processo produttivo a basso impatto ambientale. Vengono impiegati per l'isolamento esterno e interno dell'involucro, così come nella correzione dei ponti termici, in abbinamento con tamponamenti monostrato in blocchi, e nell'isolamento di solai freddi (garage e cantine) e di coperture.

MATERIALI DI ORIGINE ANIMALE

Gli isolanti appartenenti alla famiglia dei materiali di origine animale derivano dalla lavorazione di materie di origine animale, costituenti il loro strato di rivestimento esterno, intrinsecamente dotato di capacità termiche isolanti.

Per quanto questa classe di materiali sia notevolmente più ridotta rispetto alle altre, è possibile procedere alla sua descrizione seguendo una classificazione analoga a quella proposta sopra, definita in funzione del prodotto che deriva dalla lavorazione dei materiali di origine animale:

1. **Fiocchi e piume sfuse** per il riempimento di intercapedini, di parete e copertura, eventualmente contenute all'interno di sacchi o altri elementi di contenimento:
 - *fiocchi di lana di pecora*, ottenuti dalla lana tosata della pecora, lavata con sapone e risciacquata con soda, ed eventualmente sottoposta a un trattamento antitarmico, tramite l'utilizzo di sali di boro e derivati dell'urea;
 - *piume di animali (anatra, oca e altri volatili)*, ottenute dall'estrazione da animali volatili di allevamento, da versare all'interno di intercapedini.
2. **Pannelli e materassini** ottenuti dall'assemblaggio di materie animali, raggruppate o pressate, per il rivestimento interno ed esterno di pareti e coperture:
 - *materassini di lana di pecora*, disposti indistintamente lungo la direzione longitudinale o trasversale al piano del pannello, sopra un supporto telato, sotto forma di materassini facilmente tagliabili in formati minori mediante l'utilizzo di forbici;
 - *materassini a base di piume animali (anatra, oca e altri volatili da allevamento)*, costituite da piume miscelate e pressate con altri materiali termicamente isolanti.

MATERIALI DI ORIGINE SINTETICA

Gli isolanti appartenenti alla famiglia dei materiali di origine sintetica derivano da un lungo e complesso processo di lavorazione del petrolio. In ambito di isolanti termici nel settore dell'edilizia, nonostante la grande diffusione di questi materiali li abbia resi particolarmente convenienti dal punto di vista economico, i polimeri sintetici presentano un elevato impatto ambientale, in termini di energia grigia inglobata durante l'intero ciclo di vita. Infatti, essi sono ottenuti a partire da una risorsa limitata, che comporta la gravosa emissione di CO₂ da parte delle industrie petrolchimiche e che necessita di energie per essere trasportata fino al sito di lavorazione. Inoltre, pur non presentando particolari fattori inquinanti durante la fase di posa in opera e durante la fase di vita utile, occorre rilevare come, al termine della vita media tra i 30 e 50 anni, il riutilizzo di questi materiali sotto forma di pannelli isolanti è possibile soltanto se il materiale è puro, cioè pulito e non accoppiato ad altri materiali. L'unico sistema di riutilizzo indistintamente adottato consiste nella loro frantumazione per l'ottenimento di agglomerati o come materiale di riempimento.

All'interno di questa categoria di isolanti termici, i materiali possono essere classificati ulteriormente, in funzione del prodotto che deriva dalla loro lavorazione:

1. **Granuli, capsule e fibre** di materiale sintetico per il riempimento di intercapedini, di parete e copertura, eventualmente contenute all'interno di sacchi o altri elementi di contenimento:
 - *granuli di Aerogel GSA (Granular Silica Aerogel)*, derivati dal processo di essiccamento supercritico delle particelle di silice, grazie al quale si ottiene un gel dalla struttura microcellulare porosa che connota la bassa densità del prodotto isolante, costituito dal 95% di aria. I granuli GSA nanostrutturati, di diametro variabile 10-6-10-2 m, sono incolori e trasparenti come tutti i TIM (Thermal Insulating Materials), potendo così essere impiegati anche per il riempimento dell'intercapedine di un doppio vetro, per migliorarne le capacità isolanti;
 - *capsule a cambiamento di fase PCM (Phase Changing Materials)*, costituite da un materiale sintetizzato artificialmente, dotato della proprietà fisica che gli consente di assorbire calore passando dallo stato solido allo stato liquido viscoso, da rilasciare quando l'abbassamento della temperatura comporta il suo ritorno allo stato iniziale. Grazie alla loro reversibilità e al loro comportamento "dinamico" che interagisce attivamente con il contesto esterno, i PCM possono essere impiegati per regolare le prestazioni termiche dell'involucro edilizio, purché siano contenuti all'interno di una struttura idonea, in grado di resistere alle continue variazioni di volume conseguenti al cambiamento di fase.
2. **Pannelli, materassini e rotoli** per il rivestimento esterno o interno di pareti e coperture:
 - *pannelli di fibre di poliestere*, derivati dal processo di lavorazione delle fibre di poliestere

che vengono miscelate, cardate e stratificate a formare materassini isolanti ed ecosostenibili. Infatti, queste fibre rappresentano l'unico materiale di origine sintetica con un ridotto impatto ambientale durante la produzione, in quanto non richiede l'uso di agenti espandenti;

- *pannelli di polistirene espanso*, derivati dal processo di espansione del polimero dello stirene, al fine di creare una lastra leggera di granuli, idonea per la realizzazione dello strato esterno di isolamento termico dei sistemi a cappotto (ETICS – External Thermal Insulation Composite System);
- *pannelli di polistirene espanso sinterizzato (EPS)*, derivati dal trattamento termico di sinterizzazione del monoblocco di granuli di polistirene espanso, ad elevata temperatura, al fine di ottenere un pannello indivisibile, facilmente tagliabile e installabile in opera, oltre che dotato di buone prestazioni termiche;
- *pannelli di polistirene espanso estruso (XPS)*, derivati dal processo di estrusione dei granuli di polistirene espanso, che vengono fusi, insufflati con gas a pressione ed estrusi secondo la forma prestabilita attraverso la trafilata posta in testa dell'estrusore a vite senza fine;
- *pannelli di poliuretano espanso*, derivati dal processo di espansione del polimero uretanico, al fine di creare una lastra leggera di schiuma di poliuretano, idonea per la realizzazione dello strato esterno di isolamento termico dei sistemi a cappotto (ETICS), generalmente rivestito da uno film sottile protettivo su entrambi i lati;
- *pannelli di polietilene espanso*, derivato dal processo di espansione del polietilene, ottenuto per estrusione di una miscela di componenti polimerici e agenti, al fine di ottenere lastre leggere, isolanti e resistenti;
- *materassini a base di polipropilene*, a base di polimero termoplastico polipropilene, derivato dal processo di espansione di una miscela di propene omopolimero e polietilene, dal quale si ottiene uno strato impiegabile singolarmente o abbinato ad altri strati sottili di gomma, alluminio o ancora tessuto non tessuto;
- *materassini multistrato termoriflettenti*, costituiti da due o più strati, suddivisi in piccole celle ricoperte da facce di alluminio, protette da un sottile film in polietilene, in grado di riflettere la radiazione solare e annullare l'irraggiamento, con significativi effetti positivi sulle prestazioni termiche;
- *pannelli TIM (Thermal Insulating Materials)*, derivati dalla particolare conformazione geometrica assegnata al materiale trasparente di partenza, vitreo o più comunemente plastico, generalmente PMMA (Polimetilmetacrilato) o PC (Policarbonato). I TIM sono dotati di capacità termiche isolanti paragonabili a quelle dei materiali opachi, grazie alla suddivisione in celle data dalla struttura capillare o dal sistema a nido d'ape, presentando al contempo un alto valore di trasmittanza luminosa, grazie alla trasparenza tipica del materiale;
- *pannelli di TWD (Thermische Waerme Daemmerung)*, derivati dalla lavorazione di un ma-

teriale sintetico, generalmente PMMA o PC, permeabile alla luce visibile, estruso a formare sottili tubi verticali che attraversano trasversalmente il pannello. I pannelli TWD, che rappresentano una particolare applicazione dei TIM, sono combinati a una parete in muratura massiva, per configurare un sistema costruttivo basato sul medesimo principio di guadagno diretto e accumulo sfruttato dal muro Trombe-Michel;

- *pannelli monolitici di Aerogel MSA (Monolithic Silica Aerogel)*, derivati da un particolare processo di essiccamento supercritico delle particelle di silice, grazie al quale si ottiene un gel dalla struttura microcellulare porosa che connota la bassa densità del prodotto isolante, costituito dal 95% di aria. Le lastre MSA, di spessore variabile di 8-20 mm, sono incolori e trasparenti come tutti i TIM, potendo quindi essere impiegati anche per colmare l'intercapedine di un doppio vetro, al fine di migliorarne le capacità isolanti;
- *cuscini di ETFE (Etilene TetraFluoroEtilene)*, composti da due membrane di polimero parzialmente fluorato, trasparente e leggero, resistente e termicamente isolante, a racchiudere una camera d'aria che contribuisce all'isolamento termico dell'involucro mediante un sistema interamente riciclabile;
- *pannelli VIP (Vacuum Insulating Panels)*, costituiti da un involucro ermetico in alluminio che confina una lastra di schiuma di acido silicico, all'interno del quale viene praticato il vuoto ("spazio evacuato") al fine di eliminare i moti convettivi, e dunque migliorare le prestazioni termiche.

MATERIALI DI ORIGINE COMPOSITA

Gli isolanti appartenenti alla famiglia dei materiali di origine composita derivano dalla combinazione di due o più componenti, al fine di creare un sistema compatibile ed efficiente, dal comportamento prestazionale migliore per i requisiti richiesti, determinato dall'azione combinata degli elementi assemblati.

Generalmente, i materiali isolanti di origine composita si presentano sotto forma di pannelli o materassini, composti da materiali differenti abbinati e tenuti insieme mediante additivi introdotti durante il processo di lavorazione, oppure tramite elementi di connessione, come collanti o fili.

Di seguito si elencano soltanto alcuni dei molteplici materiali di origine composita presenti sul mercato, comprendendo alcuni materiali innovativi oggetto delle ultime ricerche in ambito di tecnologia dei materiali per l'edilizia:

1. **Pannelli e rotoli** per l'isolamento esterno o interno di pareti perimetrali e coperture:

- *pannelli in fibra di cocco accoppiata con pannello di sughero*, composti dall'abbinamento di due materiali di origine vegetale, assemblabili sotto forma di pannelli doppio strato o pannelli sandwich con anima di sughero, a costituire lastre di materiale altamente termo-fonoisolante;
- *pannelli di fibre di kenaf e canapa*, composti dall'abbinamento di due materiali di origine vegetale, le cui fibre sono miscelate e legate mediante fibre di rinforzo in acido polilattico PLA estratto dalle pannocchie del mais oppure in poliestere, di origine sintetica;
- *pannelli composti da polistirene espanso sinterizzato EPS e strati di gomma*, costituiti dall'abbinamento di due materiali di origine sintetica, assemblati a formare un'anima in polistirene espanso sinterizzato (EPS) racchiusa da due lastre di in gomma ottenuta parzialmente dal recupero di pneumatici dismessi, legati da poliuretani polimerizzati;
- *pannelli e materassini in granuli di gomma riciclata da pneumatico*, costituiti da una miscela di granuli misti di gomma riciclata vulcanizzata, assemblati mediante leganti a base di resine poliuretaniche, a costituire pannelli termo-fonoisolanti;
- *pannelli composti da gomma riciclata SBR (Styrene Butadiene Rubber) e carta bitumata*, costituiti dall'abbinamento di due materiali compatibili ma di origine diversa, composti per il 90% da granuli di gomma riciclata di origine sintetica, incollati a caldo, racchiusi tra due supporti di carta bitumata, ossia da cartafeltro di origine vegetale, impregnata a caldo di bitume distillato;
- *pannelli composti da granuli di sughero e di gomma riciclata SBR*, costituiti dall'abbinamento di due materiali compatibili ma di origine diversa, composti da una miscela bilanciata di granuli di sughero e di gomma riciclata SBR, mescolati e legati a caldo e racchiusi da due pareti di carta feltro, eventualmente assemblati mediante leganti ureici o poliuretanici;

- *pannelli in fibre naturali e poliestere*, costituiti dall'abbinamento di fibre di origine diversa, le une provenienti da tessuti di origine naturale e animale, le altre provenienti dal poliestere di origine sintetica, legate attraverso un processo di coesione termica;
 - *pannelli e rotoli isolanti in fibre tessili di riciclo*, costituiti da fibre tessili vergini e maggiormente da fibre riciclate di cotone, provenienti da scarti di lavorazione industriale, assemblate senza l'utilizzo di additivi chimici o colle tossiche, e semplicemente sottoposte a un trattamento antibatterico e antifungino;
 - *pannelli accoppiati in lana di legno mineralizzata e polistirene espanso sinterizzato (EPS)*, composti da due strati esterni di lana di legno mineralizzata con cemento Portland, contenenti uno strato interno di polistirene espanso sinterizzato;
 - *pannelli in poliestere PET (Polietilene tereftalato)*, composti interamente da poliestere proveniente dalla raccolta urbana differenziata, senza l'aggiunta di sostanze additive tossiche, dunque totalmente ecosostenibile in quanto a bassissimo contenuto di energia grigia;
 - *rotoli composti da EPS e membrana bituminosa*, costituiti dall'accoppiamento di listelli in EPS con una membrana bituminosa impermeabilizzante liscia o ardesiata o leggermente armata, a costituire rotoli di materiale termicamente isolante, flessibili e adattabili alla geometria della struttura di supporto.
- 2. Intonaci e malte** per la realizzazione di uno strato protettivo e termicamente isolante, per quanto debolmente, che funga principalmente da filtro "attivo" e adattivo per la regolazione del comportamento dinamico del sistema di involucro:
- *termointonaco a base di calce e truciolo vegetale*, costituito esclusivamente da materie prime naturali, tra cui truciolo di origine vegetale (microscaglie di sughero o truciolo di canapa), assemblate grazie all'uso di un legante a base di calce naturale di origine minerale, per realizzare un intonaco totalmente ecosostenibile in grado di ridurre le dispersioni di calore delle pareti esterne e il degrado legato alla formazione di muffe e condensa;
 - *vernici e rivestimenti nanostrutturati termici*, ottenuti dalla lavorazione di materie prime innovative interamente riciclate, sviluppate su scala nanomolecolare (definita come minore del decimo di micrometro in una dimensione almeno), al fine di potenziarne i requisiti prestazionali in termini di efficienza energetica, potere termoisolante e termo riflettente;
 - *intonaco termocromico*, costituito da pigmenti termocromici provenienti dai coloranti al tino (di origine vegetale o sintetica), uniti a un composto sintetico derivato dal processo di sintesi di scarti di poliuretano riciclati, per il microincapsulamento dei pigmenti, e ad altri composti chimici. Pur avendo un ridotto potere termico isolante, questo materiale presenta elevati potenziali per il regolamento della temperatura superficiale degli edifici, grazie alla particolare composizione chimica. I pigmenti termocromici presentano la proprietà fisica di cambiare

colore al variare della temperatura dell'ambiente circostante, conferendo all'intonaco esterno la proprietà ottica di assumere una colorazione chiara durante le ore più calde, al fine di riflettere e respingere la radiazione solare, e viceversa diventare più scuro durante le ore più fredde, al fine di massimizzare l'assorbimento di energia termica. Questo materiale, ancora oggetto di studio e ricerca in continua evoluzione, può rappresentare un dispositivo cromogenico valido per la realizzazione di sistemi di involucro "attivo", capace di adattarsi alle oscillazioni climatiche durante i cicli giorno-notte ed estate-inverno²⁵;

- *malta AAM (Alkali Activated Materials) a base ceramica*, derivata dal processo di attivazione alcalina, svolto a temperatura ambiente, di materie prime inorganiche a base di calcio-alluminio-silicato, assemblate ad altre sostanze chimiche e a un agente aerante per la formazione di bolle d'aria all'interno della malta così ottenuta. Qualora la composizione dell'AAM sia prevalentemente a base di allumino-silicati, come nel caso del metacaolino, il materiale prende il nome di geopolimero. Questa malta AAM, ancora oggetto di studio e di ricerca²⁶, può contribuire significativamente a migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro edilizio, sfruttando sia il potere isolante della malta aerata, principalmente costituita da materiali a base silicea, sia l'inerzia termica data dalla massività dello strato isolante a base ceramica. Grazie alla versatilità dell'impasto geopolimerico, questo materiale può essere impiegato sia sotto forma di termointonaco, sia sotto forma di pannelli prefabbricati ottenuti dal getto di impasto all'interno di casseforme.

²⁵ Per approfondimenti si veda il paragrafo III.2 - *Il Sistema innovativo di involucro a trama esagonale G-SKinnED - Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design*, dedicato specificamente alla trattazione di questo tema.

²⁶ Le ricerche in ambito di AAM (*Alkali Activated Materials*) sono sviluppate dal gruppo di ricerca dell'Unità Operativa Recupero e Restauro del CIRI - Edilizia e Costruzioni dell'Università di Bologna che, dal 2012, sta conducendo sperimentazioni costruttive volte alla caratterizzazione di un materiale ecosostenibile, a basso impatto ambientale, dotato di buone proprietà meccaniche e termiche. Per ulteriori approfondimenti, si veda il paragrafo III.2 - *Il Sistema innovativo di involucro a trama esagonale G-SKinnED - Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design*, dedicato specificamente alla trattazione di questo tema.

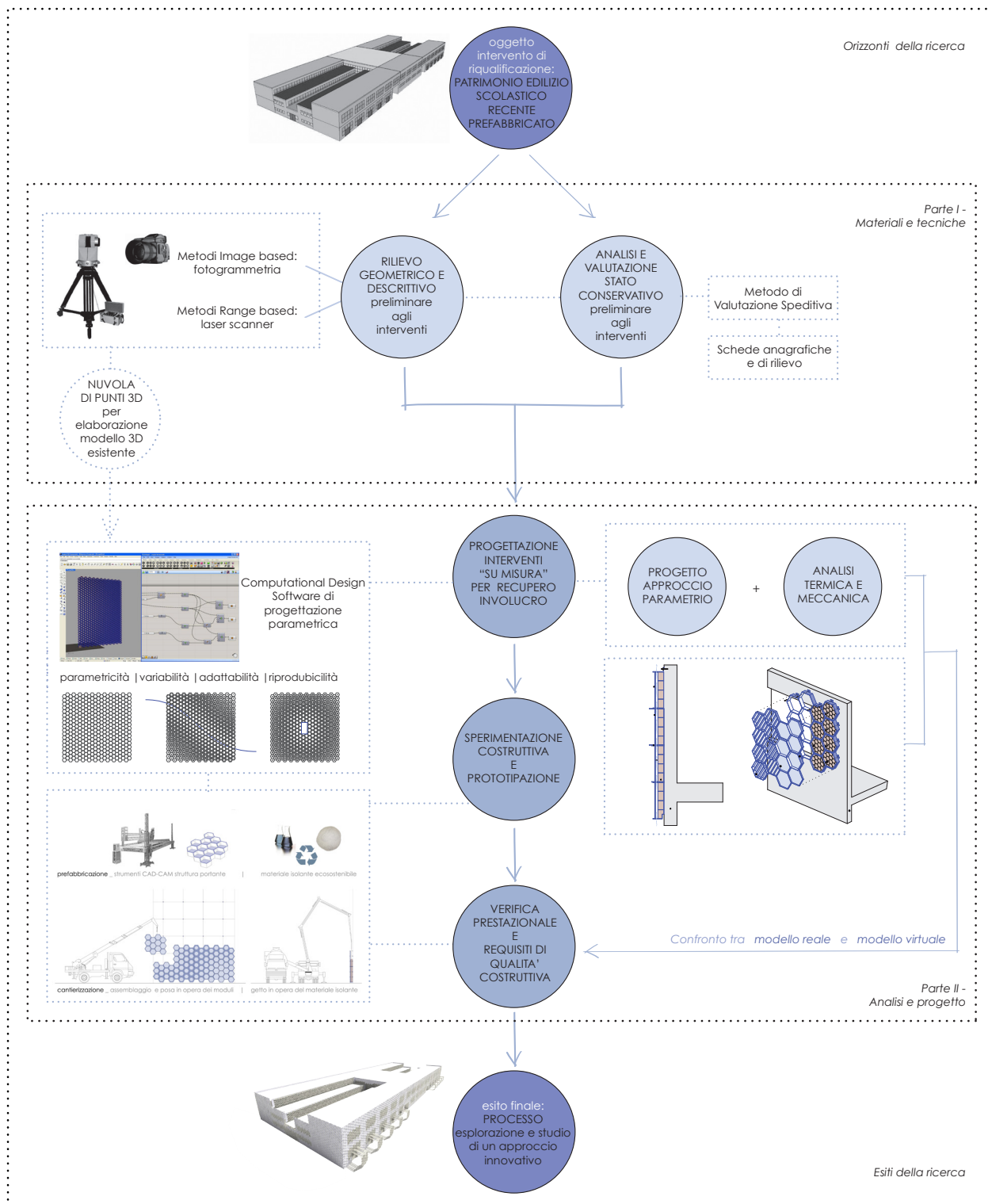
II. Processi e metodi per la riqualificazione dell'involucro
Processus et méthodes pour la rénovation de l'enveloppe

INTRODUZIONE

All'interno di questo capitolo si intende proporre un approccio innovativo che guidi progettisti e operatori durante lo svolgimento degli interventi di recupero del costruito, accompagnandolo durante l'intero processo che, a partire dall'analisi, conduca al progetto e alla sua realizzazione finale [Fig. 1].

L'oggetto di intervento è rappresentato dal patrimonio edilizio scolastico recente (1960-80) di Bologna, che attualmente presenta importanti carenze in relazione agli aspetti prestazionali (energetici e strutturali), manutentivi e di qualità architettonica. La prima fase del processo riguarda la ricognizione del patrimonio e l'analisi dello stato di fatto, comprendente il rilievo geometrico e descrittivo (svolto mediante strumenti e metodi fondati sull'impiego integrato di fotogrammetria e laser scanner) e la valutazione dello stato conservativo svolta seguendo un protocollo speditivo. La combinazione di queste attività porta alla redazione di schede anagrafiche e di rilievo per ognuna delle scuole analizzate, volto a costituire un completo quadro descrittivo e un valido punto di partenza per la progettazione degli interventi.

Successivamente alla fase di analisi preliminare, ha inizio la fase di progettazione degli interventi "su misura" per il recupero dell'involucro edilizio dei fabbricati scolastici. Questa fase si avvale dell'approccio parametrico per la progettazione della morfologia del secondo involucro da giustapporre alle facciate esistenti degli edifici in oggetto. Infatti, tramite l'acquisizione del rilievo geometrico svolto con il laser scanner, è possibile gestire il processo di acquisizione della nuvola di punti tridimensionali che definisce la volumetria della scuola, importandola all'interno di un software di modellazione parametrica (*Rhinoceros+Grasshopper*). La possibilità offerta dal Design computazionale di modellare superfici in grado di adattarsi alla morfologia dei fabbricati esistenti, adempiendo alle prerogative di parametricità, variabilità, adattabilità e riproducibilità, costituisce un aspetto innovativo per la progettazione di interventi secondo il medesimo approccio integrato, applicabile agli edifici scolastici che presentano le stesse caratteristiche architettoniche e costruttive. Una volta elaborata la geometria del nuovo involucro edilizio, definita grazie all'utilizzo di software parametrico-variazionali a elevata precisione (*Wolfram Mathematica*), è possibile esportare le coordinate geometriche, al fine di realizzare un modello virtuale su cui svolgere analisi meccaniche (con software basati sul metodo agli elementi finiti, quali *Cast3M 2000*) e termiche (con software che operano in regime dinamico, quali *DesignBuilder+EnergyPlus*). I risultati ottenuti da queste analisi numeriche vengono in seguito confrontati con i risultati ottenuti dalle misurazioni e dai test svolti sui modelli reali, realizzati in seguito alle fasi di prototipazione e sperimentazione costruttiva, che costituiscono la parte essenziale di verifica delle prestazioni e dei requisiti di qualità costruttiva. In linea con una delle principali prerogative di gestione degli interventi di recupero secondo un processo continuo e integrato, si prevede la possibilità di gestire in modo facile e rapido



[Fig. 1] Schema rappresentativo dell'approccio proposto per la conduzione del processo progettuale in ambito di Recupero del costruito.

il passaggio dal modello virtuale a quello reale, ricorrendo all'utilizzo di macchine a controllo numerico CNC per la fabbricazione digitale delle geometrie di progetto, attraverso l'uso di interfaccia CAD-CAM.

All'interno del lavoro di Tesi, la formulazione di due soluzioni progettuali di involucro risulta fondamentale per l'illustrazione a titolo dimostrativo dell'applicazione del processo progettuale proposto per la riqualificazione delle facciate esistenti [Fig. 1]. Infine, si propone un progetto di massima per la riqualificazione energetica di un edificio scolastico selezionato all'interno del repertorio delle Scuole Medie prefabbricate realizzate a Bologna tra gli anni Sessanta e Settanta, mediante l'applicazione di uno dei due sistemi tecnologici di involucro elaborati e proposti, svolti presso le due sedi universitarie coinvolte nella cotutela, l'una presso l'*Université Paris-Est*, l'altra presso l'Università di Bologna.

Infine, occorre rilevare che l'esito finale del progetto di ricerca non riguarda l'elaborazione di due specifiche soluzioni progettuali di involucro, che risulterebbe alquanto riduttiva, oltre che non totalmente esaustiva, in quanto le tecniche proposte necessiterebbero ulteriori verifiche e sperimentazioni. La significatività del risultato finale non riguarda nemmeno la realizzazione di un progetto di intervento, per quanto esso rappresenti indubbiamente un importante strumento di rappresentazione del processo progettuale proposto.

Come evidenziato all'interno del capitolo conclusivo, l'obiettivo principale della presente Tesi di Dottorato consiste invece nella presentazione di un nuovo approccio integrato, a supporto di operatori e progettisti, per la gestione dell'intero processo progettuale degli interventi di Recupero volti all'efficientamento energetico degli edifici mediante addizione volumetrica in facciata.

II.1 RILIEVO GEOMETRICO PRELIMINARE AGLI INTERVENTI SUL COSTRUITO

Nell'ambito degli interventi di recupero, acquista valore fondamentale la fase preliminare di svolgimento del rilievo metrico per la restituzione grafica del fabbricato oggetto di intervento e la successiva progettazione degli interventi volti alla trasformazione dello stesso.

Gli attuali strumenti di rilievo di cui dispongono gli operatori presentano una elevata precisione, oltre che grandi potenziali in termini di capacità di interfacciarsi e connettersi con altri software più specificamente usati per la progettazione degli interventi.

Le nuove tecniche e tecnologie digitali restituiscono infatti una descrizione metrica molto accurata del territorio e degli edifici, offrendo i dati e le condizioni di partenza ottimali per lo svolgimento di attività di restauro sul patrimonio architettonico vincolato e di interventi di recupero sul patrimonio edilizio recente.

In questo paragrafo si vuole fornire una sintesi delle tecniche digitali esistenti per il rilievo, illustrandole schematicamente nell'ottica di un nuovo approccio integrato alla progettazione, che preveda un flusso continuo di informazioni e dati, numerici e grafici, che dalla fase preliminare di rilievo geometrico consenta di giungere alla progettazione "su misura" degli interventi di recupero, e di supportarla fino alla fase ultima di realizzazione e costruzione.

Le due fasi che costituiscono il processo di rilievo di un edificio sono la fase di acquisizione del dato metrico e la fase di rappresentazione e restituzione dei dati.

Per quanto riguarda la prima fase, nell'ambito dell'acquisizione del dato metrico, le due tecniche digitali che attualmente rivestono il maggiore interesse sono i metodi *Image based*, basati sulla fotogrammetria digitale, e i metodi *Range based*, ossia il laser scanner o il laser a scansione terrestre.

La seconda fase di rappresentazione e restituzione dei dati, invece, che richiede grande attenzione e accuratezza, viene attualmente condotta mediante l'adozione delle tecnologie moderne, che si suddividono in prodotti vettoriali e *raster*: ortofoto di precisione, raddrizzamenti fotografici, modelli tridimensionali foto-realistici, generati a partire da dati fotogrammetrici e da dati laser.

Come verrà illustrato nel corso dei paragrafi successivi, risulta di particolare interesse per il processo progettuale proposto ed esplorato dal progetto di ricerca la realizzazione di modelli tridimensionali per la realizzazione di *mesh* (triangolazione), secondo il metodo degli elementi finiti.

Di seguito vengono illustrati i principali metodi di rilievo geometrico e descrittivo impiegati nell'ambito architettonico, archeologico e topografico:

- **metodi *Image based*:** fotogrammetria;
- **metodi *Range based*:** laser scanner.

METODI *IMAGE BASED*: FOTOGRAMMETRIA

L'acquisizione del dato metrico può avvenire avvalendosi dei metodi *Image based*, basati su immagini. Essi consentono di ottenere il rilievo metrico di un oggetto attraverso la restituzione di un'immagine digitale, cioè di una matrice di elementi di immagine, detti *pixel*, il cui contenuto radiometrico (costituito dal valore bianco e nero, da un livello di grigio, o da un valore *RGB - Red Green Blue*) è espresso da una funzione continua, le cui due variabili sono spaziali¹.

In generale, per questa metodologia, svolge un ruolo fondamentale il sensore, connesso allo strumento utilizzato per condurre il rilievo, di dimensioni variabili: esso misura la quantità di luce incidente, che viene convertita sotto forma di tensione elettrica con intensità proporzionale, a sua volta trasformata da un convertitore analogico/digitale in *digital number*, cioè in *bit* di informazioni. In questo modo, il sensore consente di raccogliere e accumulare le informazioni trasportate dall'energia elettromagnetica e renderle accessibili all'utente, restituendo un'immagine digitale che consiste in una matrice di pixel.

Indipendentemente dal metodo di acquisizione, un'immagine digitale non è un'entità esprimibile mediante un'espressione analitica chiusa e, di conseguenza, risulta necessario ricercare una funzione discreta che la rappresenti. L'operazione di conversione da una rappresentazione continua a una discreta si chiama digitalizzazione, e avviene campionando le variabili spaziali e quantizzando i valori radiometrici corrispondenti. Questo procedimento può avvenire in maniera diretta, tramite l'impiego di una camera digitale, o in maniera indiretta, cioè digitalizzando tramite uno scanner un'immagine diapositiva o negativa.

Il processo di formazione di un'immagine digitale consiste quindi in due operazioni, la quantizzazione e il campionamento, che sono direttamente legate alle due caratteristiche fondamentali di questo tipo di immagini, la risoluzione radiometrica e la risoluzione geometrica.

La risoluzione radiometrica è direttamente legata alla quantizzazione, ossia alla conversione, eseguita dal sensore, dell'intensità del segnale luminoso in un numero intero, il cui valore viene memorizzato in corrispondenza di ciascun pixel. A seconda della quantità di numeri nella quale viene trasformata l'intensità luminosa, si può rappresentare l'immagine tramite un determinato numero di livelli di radianza. Esistono tre differenti tipologie di rappresentazione: in bianco e nero (se si ottengono due valori, 1 e 0, cioè bianco e nero), a palette di colori o a toni del grigio (se si ottengono 256 numeri, compresi tra 0 e 255, cioè tra nero e bianco), o ancora in modalità Tavolozza, cioè immagini *RGB* o *YCM* (se si ottengono tre canali, che rappresentano i tre livelli di *RGB - Red Green Blue*, oppure i tre livelli di *YCM - Yellow Cyan Magenta*).

¹ Girelli V. A., *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche, Facoltà di Ingegneria - Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, 2007.

L'altro fattore fondamentale nella definizione di un'immagine consiste nella risoluzione geometrica, direttamente legata al campionamento, cioè alla porzione di immagine legata a ciascun elemento del sensore. La risoluzione geometrica è espressa da un parametro, chiamato *DPI* (*Dots per Inch*, cioè punti per pollice), che indica la dimensione dei pixel, fornita dal numero di pixel contenuti in una unità di lunghezza. Il suo valore è direttamente proporzionale alla grandezza della matrice bidimensionale costituita dai pixel di definizione dell'immagine, contenenti l'informazione. Pertanto, un'elevata risoluzione geometrica comporta la generazione di una matrice con un elevato numero di righe e di colonne, cioè un elevato numero di pixel di piccole dimensioni, solitamente di forma quadrata. Direttamente legata alla dimensione del pixel è la definizione del sistema di coordinate di riferimento interno dell'immagine, la cui relazione rispetto ad ogni pixel deve essere definita qualora si voglia utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici.

Tra i vari metodi *Image based*, la fotogrammetria rappresenta un potente strumento, grazie alle sue peculiarità di flessibilità, rapidità di acquisizione delle immagini e bassi costi, in quanto spesso realizzata utilizzando camere a medio-basso costo. Adottata sempre più di frequente per condurre il rilievo di aree, singoli edifici o altri oggetti di interesse storico, architettonico e archeologico, il suo utilizzo è stato ampliato ulteriormente dalla diffusione progressiva delle tecniche digitali. Una delle proprietà più interessanti riguarda proprio la flessibilità offerta e la possibilità di eseguire rilievi a scale diverse, mantenendo sempre un'elevata qualità delle informazioni nella definizione della geometria e delle misure.

La scelta dello specifico metodo di rilievo *Image based* da impiegare viene compiuta in funzione dell'oggetto del rilievo metrico, e di conseguenza delle condizioni in cui l'operatore si trova ad intervenire, così come in funzione dell'obiettivo del rilievo, e cioè del grado di precisione che si vuole ottenere.

Indipendentemente dalla tecnica e dalla strumentazione scelta, il processo di acquisizione ed elaborazione dei dati segue sempre il medesimo processo fotogrammetrico, costituito dalle seguenti fasi: acquisizione delle immagini, tramite la realizzazione delle prese (prese ad assetto normale con camere e prese a mano libera); rilievo di appoggio, tramite la Stazione Totale (misurazioni dirette di supporto per raddrizzamenti e aggiustamenti di modelli tridimensionali); orientamento interno, tramite le tecniche di auto-calibrazione dei parametri di rilievo; orientamento esterno, tramite strumenti analitici e digitali; restituzione e generazione del prodotto finale (secondo un approccio stereoscopico o monoscopico multi-immagine, oppure secondo il metodo dei fasci proiettivi).

Per quanto riguarda l'ultima fase di restituzione del rilievo, nel caso specifico della fotogrammetria terrestre per il rilievo di singoli oggetti edilizi (ma non per la fotogrammetria aerea per il rilievo di intere aree), si distinguono due categorie di sistemi digitali: i sistemi stereoscopici, che consentono l'automatizzazione della maggior parte delle procedure di elaborazione e restituzione dei dati, a fronte di costi più elevati, e i sistemi monoscopici multi-immagine, che presentano costi

più ridotti e una maggiore facilità di utilizzo e accessibilità da parte dell'utente, a fronte della necessità di essere supportati da software adeguati per la collimazione manuale dei punti durante la fase di restituzione dei dati. In particolare, la grande potenzialità offerta dai sistemi stereoscopici, seppur più costosi, che realizzano il rilievo tramite lo svolgimento di più prese (in assetto normale o psuedo-normale) su ognuno dei lati dell'edificio, consiste nella possibilità di ottenere un'ampia gamma di risultati: ortofoto di facciate di edifici, modelli tridimensionali costituiti da superfici riconoscibili, e restituzioni vettoriali tridimensionali.

Infatti, successivamente alla restituzione del dato, avviene la fase di generazione dei modelli digitali tridimensionali costituiti da superfici (*Digital Surface Models*), che rappresenta la parte essenziale per l'integrazione del procedimento di rilievo metrico all'interno dell'intero processo progettuale esposto dal progetto di ricerca. Questi modelli 3D possono essere generati in modo manuale oppure parzialmente o totalmente automatico, a seconda che vengano utilizzati restitutori analitici o digitali. I restitutori digitali, che consentono di generare superfici in modo completamente automatico, offrono inoltre la possibilità di completamento del modello a posteriori, integrando le superfici con informazioni aggiuntive.

Infine, il processo fotogrammetrico si conclude con la fase di restituzione di un prodotto metrico *raster*, sul quale è possibile svolgere ulteriori operazioni di elaborazione dei dati e di miglioramento della resa grafica, in funzione delle finalità per le quali il rilievo viene condotto. In particolare, una volta ottenuta un'immagine *raster* dal processo di rilievo, è possibile ottenere dei raddrizzamenti di immagine e delle ortofoto, così come dei modelli tridimensionali che consentano di rappresentare in maniera foto-realistica l'oggetto di intervento. Una ulteriore possibilità offerta da questi strumenti consiste nella possibilità di esportare il file in formati speciali, compatibili con altri software di modellazione tridimensionale e progettazione parametrica, la cui interfaccia è oggetto continuo di studio e ricerca.

METODI *RANGE BASED*: LASER SCANNER

I metodi *Range based* (come i metodi *Image based*) sono basati sulle onde luminose, questa volta recepite tramite la presenza di sensori attivi che, al termine dell'attività di rilievo, forniscono un insieme di coordinate tridimensionali riferite a una "nuvola di punti" all'interno di un sistema di riferimento preciso.

Il laser è uno strumento che si basa sul principio dell'emissione di energia elettromagnetica, sotto forma di un fascio di fotoni costituenti il raggio laser, in cui la luce è generalmente monocromatica, cioè caratterizzata da un'unica lunghezza d'onda, ed emessa con un raggio molto ristretto, a differenza di quanto accade per la luce naturale.

Gli strumenti di laser scanner si classificano in funzione degli elementi utilizzati per generare

il raggio luminoso (gas, sorgenti allo stato solido, o materiali semiconduttori), del grado di sicurezza e pericolosità per la vista degli operatori, e ancora in funzione del principio di funzionamento (principalmente laser triangolatori e laser distanziometrici).

In sintesi, i sistemi a triangolazione funzionano tramite l'azione di un raggio laser che colpisce l'oggetto secondo una scansione regolare e, pertanto, l'accuratezza della misura dipende dal segnale riflesso dalla superficie colpita dell'edificio oggetto di rilievo all'unità ricevente. I sistemi distanziometrici, invece, si basano sul principio di determinazione delle coordinate polari di ogni punto a partire dalla conoscenza dei due angoli di emissione del raggio e della distanza fra il centro dello strumento e il primo punto incontrato dal raggio: la loro accuratezza, quindi, dipende dal segnale riflesso dalla superficie dell'edificio alla camera. In ogni caso, oltre che dalla capacità di riflessione della superficie colpita appartenente al fabbricato esistente (maggiore per le superfici bianche, e minore per le nere), l'intensità del segnale riflesso è influenzata da molteplici fattori, quali le condizioni atmosferiche e climatiche, e dunque la temperatura, la pressione e l'umidità dell'ambiente, la distanza tra lo strumento e il fabbricato oggetto di rilievo, e dunque anche l'angolo di incidenza del raggio laser.

Indipendentemente dalla tecnica e dalla strumentazione scelta, il processo di acquisizione ed elaborazione dei dati seguirà sempre il medesimo processo.

In primo luogo, molta accuratezza deve essere dedicata alla fase preliminare di impostazione del rilievo, costituita dalla scelta dello strumento più idoneo per svolgere il rilievo metrico, in funzione delle caratteristiche dell'oggetto e delle finalità dell'operazione, affiancata dalla pianificazione della quantità e del posizionamento dei punti di acquisizione del dato, finalizzata alla migliore completezza del risultato finale.

Una volta programmate le varie tappe dell'operazione di rilievo, è possibile dare inizio alla vera e propria attività di rilievo, gestibile in maniera automatica, grazie agli strumenti laser scanner, sempre maggiormente avanzati.

Un ruolo fondamentale è svolto dal software scelto per la gestione successiva dei numerosi dati contenuti nella nuvola di punti, che rappresenta il prodotto finale della misurazione con il laser scanner. In generale, il software selezionato deve rispondere al meglio ai requisiti richiesti per svolgere le principali operazioni: controllo e gestione dell'acquisizione dei dati; pre-trattamento dei dati tramite la pulitura dai punti che non appartengono all'oggetto da rilevare e registrazione dei punti che effettivamente gli appartengono; trattamento dei dati tramite modellazione 3D e integrazione con informazioni digitali aggiuntive di tipo *frame*.

L'ultima fase relativa alla modellazione tridimensionale rappresenta il momento essenziale della fase di rilievo metrico, in quanto consiste nel passaggio dalla nuvola di punti ottenuta con il laser scanner alla generazione di una superficie continua, costituita da *mesh*, per la creazione di un modello 3D. Tale trasformazione avviene in forma più o meno automatica, in base alla com-

plessità della geometria degli elementi oggetto del rilievo: naturalmente, per oggetti più complessi caratterizzati da un maggior numero di discontinuità, il processo di elaborazione della nuvola di punti comporterà maggior tempo, oltre che una assistenza più consistente da parte dell'operatore. Per questa ragione, generalmente si procede alla suddivisione della nuvola di punti in adeguate porzioni di materia uniforme per caratteristiche e dimensioni che vengono elaborate separatamente e riassemblate soltanto alla fine, tramite operazioni principalmente manuali.

Il modello tridimensionale ottenuto tramite questi metodi e strumenti è integrabile con altre informazioni che derivano da altri strumenti di rilievo, quali ortofoto e immagini *raster*, grazie alle quali è possibile ottenere dei modelli 3D foto-texturizzati di grande qualità e validità per la capacità di rappresentare in maniera assolutamente completa l'oggetto del rilievo, apprezzabile nella sua totalità grazie alla facilità di esplorazione da parte dell'utenza².

In definitiva, la comunità scientifica internazionale riconosce l'utilizzo integrato delle tecniche di fotogrammetria e di laser scanner come soluzione ottimale per il raggiungimento di un rilievo metrico e descrittivo preciso e dettagliato. Da un confronto sintetico tra le specificità delle due tecniche di rilievo, si può sostenere infatti come esse siano complementari in termini di informazioni restituite.

La tecnica fotogrammetrica utilizza la luce ambientale (sensori passivi) per restituire una descrizione completa e precisa della morfologia di un oggetto, mentre la tecnica del laser scanner utilizza il laser o la proiezione di luce strutturata (sensori attivi) per restituire una nuvola di punti molto densa di informazioni e dati relativi alla misurazione delle distanze tra i punti. La fotogrammetria necessita di almeno due immagini che descrivano una stessa porzione di oggetto da due angolazioni diverse per generare un modello 3D, mentre il laser scanner restituisce immediatamente un insieme di dati tridimensionali, sotto forma di nuvola di punti. La fotogrammetria restituisce delle immagini *raster* di qualità molto elevata, caratterizzate dal colore e da qualsiasi dettaglio estetico, mentre il laser scanner non restituisce le caratteristiche descrittive precise dell'oggetto, quali la colorazione, la texture, la stratificazione dei materiali, o qualsiasi altra informazione relativa allo stato conservativo. Pertanto, la soluzione ottimale per ottenere un rilievo il più possibile accurato e completo di informazioni consiste nell'integrazione delle due tecniche, ad esempio nell'applicazione delle immagini fotogrammetriche sulle superfici (*mesh*) del modello 3D, elaborato a partire dalla nuvola di punti tridimensionali ottenuti dal rilievo con il laser scanner.

La sintesi esposta all'interno di questo paragrafo è volta a fornire un quadro dello stato dell'arte degli strumenti attualmente disponibili per lo svolgimento di rilievi metrici dei fabbricati oggetto di intervento, al fine di individuarne e divulgare le potenzialità offerte da questi strumenti, capaci di interfacciarsi con altri software di elaborazione digitale tridimensionale dei dati. In un'ottica di

2 Remondino F., El-Hakim S., *Image-based 3D modelling: a review*, The Photogrammetric Record, 21 (115), 2006, pp. 269-291.

sostenibilità degli interventi, la possibilità di acquisire con un elevato grado di precisione i dati metrici di rilievo di un fabbricato e di gestirne in maniera speditiva e completa l'elaborazione grafica, interfacciandosi con i software di progettazione parametrica, rappresenta un importante fattore per un nuovo approccio alla progettazione degli interventi di recupero sul patrimonio edilizio esistente.

II.2 PROGETTAZIONE DI INTERVENTI “SU MISURA”

Le architetture sostenibili e performanti sono il risultato di un approccio progettuale integrato che considera il sistema edile e i sistemi impiantistici come parti sinergiche di un'unica soluzione progettuale. La progettazione dell'involucro architettonico, inteso come superficie unitaria avvolgente, comprendendo indistintamente chiusure verticali e copertura, ha come obiettivo la realizzazione di un elemento che sia capace di abbinare a un grande valore comunicativo caratteristiche tecniche tali da garantire comfort interno e ridotti consumi energetici. Negli edifici contemporanei, l'involucro costituisce dunque il punto di convergenza e di applicazione di tutti i molteplici aspetti progettuali: forma, decorazione, materiali, energia, impianti, strutture, manutenzione e costi.

L'idea di involucro “a doppia pelle” nasce dalla volontà di progettare l'edificio secondo criteri bioclimatici, con un doppio strato che consenta di realizzare uno strato di protezione termica per attenuare il caldo estivo ed il freddo invernale. Il tema dell'involucro innovativo per gli edifici propone nuove sfide legate alla loro elevata estensione superficiale e all'altezza di posa: divengono così predominanti i fattori quali l'orientamento e l'esposizione ai venti dominanti, che possono richiedere l'applicazione di più varianti dello stesso sistema di involucro per un singolo edificio, al fine di generare una ottimizzazione dei costi di realizzazione e di gestione. Gli attuali strumenti di progettazione sono volti a definire nuovi elementi architettonici per l'involucro, che consentano di evitare di cadere nella serialità della prefabbricazione, pur ricorrendo ad essa e alle più attuali tecniche industriali, in ragione di una maggiore economicità costruttiva e rapidità di produzione e posa in opera³.

Dal punto di vista fisico, l'involucro architettonico è “la superficie di controllo che delimita il sistema termodinamico edificio”⁴. L'obiettivo dei sistemi di regolazione e interazione climatica attraverso l'involucro architettonico è quello di produrre un ambiente stabile, termicamente equilibrato, in grado di ottenere, anche in architettura, quello stato omeostatico indispensabile alla vita del mondo animale e vegetale⁵. L'analogia con il mondo biologico implica che l'edificio, inteso come “recipiente termico”, richieda una pelle o membrana che, come quella cellulare o come l'epidermide animale, sia capace di interagire e fornire una risposta adeguata, variabile alle mutevoli sollecitazioni ambientali. Tuttavia, mentre le membrane o l'epidermide rispondono a precisi criteri di funzionamento non controllabili volontariamente, in architettura la transizione di luce, calore, aria, particelle, onde e altri elementi provenienti dall'esterno, può essere regolata variando le tecni-

3 “(...) Il dettaglio costruttivo nel senso tradizionale del termine non esiste più: la collaborazione reciproca tra progettista ed industria ne ha preso il posto (...) con l'intenzione di far capire i flussi che, passando per un certo nucleo, governano movimenti, correnti, percorsi: è come se un respiro vitale riempisse le strutture e raccontasse come si genera il clima artificiale o quale sia il percorso del sole.” (Herzog T. 1996)

4 Greco A., Quagliarini E. (a c. di), *L'involucro edilizio. Una progettazione complessa*, Ar.Tec - Associazione Scientifica per la Promozione dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia, ALINEA Editrice, Firenze 2007.

5 “Ce qu'il y a de plus profond chez l'homme, c'est la peau” (Valéry P., *L'Idée fixe*, Parigi 1932.)

che costruttive o selezionando materiali differenti.

Secondo questa concezione dell'edificio, si assiste così al passaggio da un involucro edilizio "passivo", inteso tradizionalmente come un barriera protettiva dal comportamento meccanicamente statico e termicamente stazionario, a un sistema di involucro "attivo", regolabile e capace di interagire con l'ambiente circostante per ottimizzare l'efficienza prestazionale.

Dal punto di vista energetico, il punto di partenza per la progettazione deve essere la precisa definizione delle condizioni di comfort interno, per il raggiungimento del quale ogni sistema impiantistico deve funzionare soltanto come sistema complementare di supporto all'involucro. I principali parametri fisici che influenzano il comfort sono l'isolamento termico, la temperatura media delle superfici, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la tenuta all'acqua, la permeabilità all'aria, la luminanza e l'illuminamento. Generando soluzioni ibride di sistema attivo e passivo, è possibile dare forma a un involucro innovativo dotato delle caratteristiche e proprietà migliori dei due sistemi, al fine di ottimizzare il comportamento prestazionale.

Dal punto di vista costruttivo, una volta stabilita la tipologia di intervento per la realizzazione della "seconda pelle", occorre verificare il comportamento meccanico dell'elemento costruttivo, che (come anticipato nel *Capitolo I. Stato dell'arte*) può essere portato o autoportante: nel primo caso, i suoi elementi costruttivi devono essere calcolati per resistere a trazione e flessione, mentre nel secondo caso a compressione e flessione, e quindi anche a presso-flessione, con i conseguenti problemi di stabilità. Inoltre il sistema involucro deve essere progettato per sopportare e compensare la deformazione della struttura principale dell'edificio conseguente ai pesi propri o accidentali, a spostamenti dinamici causati dal vento o dai terremoti, e a variazioni dimensionali legate alla dilatazione termica.

Alla luce delle potenzialità offerte dagli strumenti attuali di progettazione, si può affermare la possibilità di raggiungere una totale integrazione tra involucro e struttura esterna dell'edificio. Il progetto di ricerca è volto all'elaborazione di un'idea progettuale basata sulle ricerche matematiche sulle forme di aggregazione della materia, che utilizzi un modulo costruttivo base (*generative component*), dotato di una particolare forma geometrica ispirata al principio di similarità e auto-aggregazione (*self similarity*), ossia di iterazione del processo generativo al variare dei parametri. Per la progettazione di un involucro edilizio dotato di queste proprietà, si ricorre sempre più spesso all'assistenza di software parametrico-variazionali per la modellazione tridimensionale e la rappresentazione delle superfici e degli elementi, che sia in grado di interfacciarsi con macchine per la produzione industrializzata degli elementi costruttivi. Infatti, software di analisi di tipo non lineare, sempre più versatili ed economicamente accessibili, permettono di progettare e verificare il comportamento dell'involucro in tutti i suoi aspetti tecnici, da quello strutturale a quello energetico. A partire dalla modellazione tridimensionale del singolo elemento è possibile simularne il comportamento in ogni condizione di carico e sollecitazione, ipotizzando l'impiego di materiali tradizionali

o definiti dal progettista.

La metodologia prevista per l'elaborazione degli elementi modulari costituenti l'involucro edilizio oggetto di ricerca consiste nella progettazione generativa. Si tratta di un approccio avanzato alla progettazione architettonica come sistema dinamico non lineare, una metodologia progettuale che gestisce la complessità del costruito operando attraverso sequenze logiche progressive. In questo modo, il progetto viene costruito come struttura operativa logica attraverso codici di trasformazione dell'esistente, verso l'elaborazione di una struttura in grado di soddisfare le prestazioni ricercate. L'obiettivo perseguito dal processo progettuale non consiste nella definizione di una forma, bensì nella ricerca di un nuovo approccio alla progettazione architettonica che fornisca la possibilità di controllare la totalità dei fattori da tenere in considerazione, offrendo allo stesso tempo maggiore libertà di forma, sempre regolata dai principi geometrici.

La progettazione degli elementi costruttivi di facciata per la realizzazione dell'involucro edilizio previsto dagli interventi di recupero, oggetto di Tesi, inizia essenzialmente con la definizione dei criteri di progetto: risulta fondamentale determinare il metodo specifico che consenta di controllare tutte le variabili da considerare, sotto il profilo della morfologia, della struttura e delle costruzioni e dell'architettura. L'idea dunque non prevede la mera automatizzazione del processo di progettazione, bensì la delineazione di una metodologia da seguire, regolata dalla definizione di aspetti spesso ancora indeterminati. Non sono le morfologie a contribuire e a delineare il progetto, bensì l'intero processo progettuale.

POTENZIALITÀ DEL *COMPUTATIONAL DESIGN*

Con il termine *Computational Design* (design computazionale), si intende la manipolazione delle informazioni che si possono presentare sotto forma di dati, materia, energia, modelli tridimensionali. I programmi, basati sugli algoritmi, rappresentano gli strumenti parametrici che consentono di realizzare una struttura basata su queste informazioni, dotate di un carattere sistemico, costruttivo e informativo. Proprio grazie alla natura delle informazioni incorporate all'interno degli oggetti e dei flussi di lavoro, le strutture di informazioni possono scorrere senza soluzione di continuità all'interno dell'intero processo progettuale, dalla concezione fino alla costruzione⁶.

Il passaggio dal CAD (*Computer Aided Design*), strumento che risulta essere tuttora quello maggiormente utilizzato dai progettisti, al CD (*Computational Design*) rappresenta una grande innovazione tecnologica, in grado di trasformare significativamente l'approccio alla progettazione architettonica.

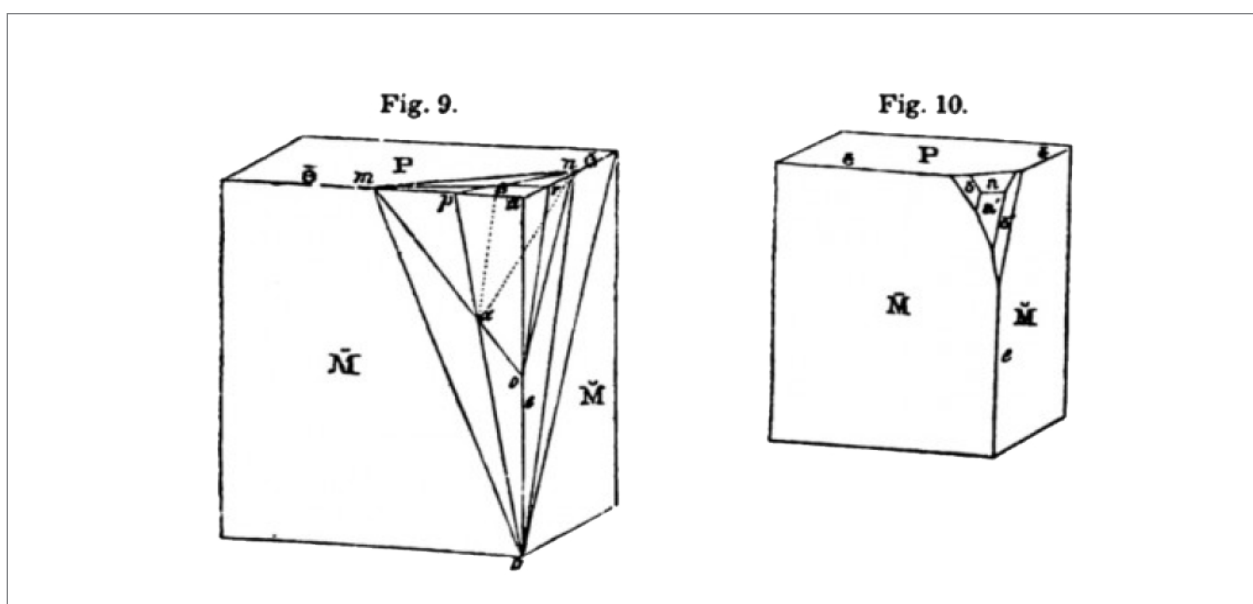
Gli strumenti CAD gestiscono il processo di progettazione semplificandone estremamente

⁶ Erioli A., *Il computer come design medium in Architettura*, in "INARCOS", n. 734, Anno LXVIII, 4_2013, pp. 7-13.

la ricerca della forma e riducendola al solo aspetto estrinseco degli oggetti di intervento, probabilmente a causa delle numerose similitudini con le proprietà raffigurative delle tradizionali tecniche di progettazione. A differenza del CAD, gli strumenti CD distolgono l'interesse dalla forma, per concentrarsi non tanto sull'oggetto della progettazione, quanto sull'intero processo di generazione della morfologia.

In sostanza, nel *Computational Design* la forma finale dell'oggetto non è più definita gradualmente da disegni e modelli in due o tre dimensioni, ma viene generata sulla base di procedure definite dall'utente, sotto forma di *scripting* e algoritmi parametrici, stabiliti in funzione di determinati parametri che contribuiscono alla creazione della morfologia durante tutto il flusso di lavoro⁷. In questo modo, diventano visibili le correlazioni tra la scrittura di algoritmi parametrici e i processi di generazione ed elaborazione delle forme: la forma finale del prodotto acquista il suo senso compiuto soltanto se considerato in relazione al processo di morfogenesi, definito dall'utente secondo una serie di istruzioni che gestiscono un flusso di informazioni che legano l'oggetto stesso con i fattori ambientali esterni.

In linea con l'analogia tra l'architettura e il mondo animale, si può considerare che per il design computazionale sia fondamentale il raggiungimento della consapevolezza che ogni forma in natura si sviluppi sempre grazie all'interazione con un materiale.



[Fig. 2] Schema rappresentativo del linguaggio parametrico alla base della variazione geometrica di una struttura cristallina, secondo una rappresentazione grafica del geologo, mineralogista e zoologo statunitense, James Dwight Dana (1813-1895).

7 “La forma manifesta - ovvero ciò che appare - è il risultato di un’interazione computazionale tra regole interne e pressione (morfogenetica) esterna, originate entrambe da altre forme affini (ecologia). Nella loro attivazione, le regole interne (non ancora concretizzate) racchiudono una forma, oggi chiaramente descritta e compresa con il termine di algoritmo” (Kwinter S. 2008)

Il principio fondamentale del Computational Design consiste proprio nel legame profondo tra la forma e il materiale, ossia tra la genesi della forma e la sua materializzazione.

La complessità delle interazioni e dei collegamenti tra i parametri considerati durante il processo progettuale comporta lo spostamento dell'interesse del progettista dalla forma dell'oggetto finale ai modelli creati ed elaborati grazie ai software di progettazione parametrica. L'elevato potenziale offerto da questo tipo di strumenti consiste proprio nella possibilità di gestire questi modelli, di controllarne la variabilità al variare dei parametri coinvolti nel processo, e di confrontare facilmente molteplici soluzioni differenti durante l'intero percorso che, dalla generazione della forma, conduce alla sua materializzazione e produzione.

Tutto questo conduce a una nuova era nel design e nella produzione industriale, aprendo improvvisamente la possibilità di ritrovare campi possibili della creatività umana, che non sarebbero nemmeno immaginabili senza l'utilizzo di strumenti informatici. Oggi, questi strumenti permettono di intervenire in maniera innovativa all'interno del processo progettuale, offrendo la possibilità concreta di apertura verso nuovi orizzonti e di sviluppo della creatività, intesa come connubio indissolubile fra arte e scienza.

La geometria computazionale diventa così un soggetto interessante per lo studio e per la combinazione di algoritmi di programmazione con la morfologia, fornendo geometrie algoritmiche note come algoritmi generativi⁸. Nonostante i software 3D aiutino a simulare quasi tutto lo spazio visualizzato, le possibilità attuali nel campo del design e dell'architettura risiedono nella nozione di algoritmo generativo, come progettazione parametrica nel campo dell'architettura. La progettazione architettonica è oggetto di potenzialità di calcolo algoritmico, e di elaborazione di geometrie con gerarchie multiple ad alto livello di complessità.

Questo approccio utilizza l'esplorazione delle variabili parametriche per capire il comportamento di un tale sistema e quindi utilizza questa conoscenza per elaborare strategie di risposta del sistema alle condizioni ambientali esterne. Attraverso questi strumenti informatici, oggi è possibile tracciare digitalmente un modello dal quale generare infinite varianti di progetto, regolando parametri geometrici di base. Per incorporare le proprietà dei sistemi, è fondamentale incorporare materiali, strutturare vincoli di fabbricazione e di assemblaggio in una logica parametrica. Si tratta dunque di un approccio che permette il riconoscimento di modelli di comportamento geometrici, delle relative capacità performative e tendenze del sistema.

8 "Con il termine *algoritmi generativi* si intende una categoria di insiemi di istruzioni caratterizzati dalla definizione di una serie di regole di interazione di base volte alla definizione progressiva di una morfologia, ottenuta come risultato delle singole funzioni coinvolte nel processo. A differenza degli algoritmi genetici (da non confondere, nonostante lo stesso suffisso *-genetic*), gli algoritmi generativi non nascono con uno scopo ben definito a priori, ma i loro confini operativi si delineano progressivamente durante la fase di elaborazione progettuale." (Erioli A., *Il computer come design medium in architettura*, in "INARCOS", n. 734, Anno LXVIII, 4_2013, pp. 7-13.)

SOFTWARE DI PROGETTAZIONE PARAMETRICA: *RHINOCEROS+GRASSHOPPER*

Con il termine *parametrico* si intende “un insieme di equazioni che esprimono un insieme di quantità come funzioni esplicite di un numero di variabili indipendenti, note come *parametri*”⁹.

La peculiarità degli strumenti parametrici consiste proprio nella possibilità offerta di provare una ampia varietà di soluzioni, grazie al controllo e alla modulazione dei parametri coinvolti all'interno del processo di progettazione. La variabilità di queste soluzioni dipende da molteplici fattori: il contesto di applicazione dell'algoritmo parametrico-variazionale, il ruolo attribuito alla fase di progettazione parametrica all'interno dell'intero processo, e dunque l'impostazione dell'algoritmo di generazione del progetto, a partire dai dati di input fino agli obiettivi e ai risultati ricercati.

Il principio sul quale si basano gli strumenti di progettazione parametrica consiste proprio nella creazione e definizione di sistemi di relazioni tra le strutture di informazioni che definiscono il problema, espresse in termini di funzioni, a loro volta riassunte e tradotte in sequenze finite di algoritmi, ossia di sequenze di istruzioni¹⁰.

La possibilità offerta dai software di progettazione parametrica di creare i propri strumenti e processi per il raggiungimento di una determinata soluzione progettuale costituisce la più importante e innovativa potenzialità.

Questi nuovi strumenti di programmazione parametrica, sempre più impiegati nel campo del design, dell'architettura e dell'ingegneria contemporanea, si pongono come uno strumento innovativo per la risoluzione dei processi progettuali. L'approccio storico che ha portato alla formulazione di soluzioni progettuali standardizzate e alla costruzione di un patrimonio edilizio tradizionale si è progressivamente consolidato basandosi sull'adozione di protocolli ben definiti, caratterizzati da un profondo distacco tra l'ambito progettuale e il relativo processo di realizzazione. Il nuovo approccio proposto, reso possibile dagli attuali strumenti di programmazione parametrica, è volto a stabilire un nuovo legame di connessione tra questi due ambiti, consentendo di controllare la totalità dei parametri coinvolti all'interno del processo progettuale, dalla prima fase di concezione, fino all'ultima di costruzione.

Considerando le potenzialità esposte sopra, i software parametrici permettono di condurre l'intero processo realizzativo secondo i principi di ottimizzazione, e dunque sostenibilità, del progetto, fino alla progettazione di oggetti e interventi “su misura”. In questo senso è inteso l'impiego di tali strumenti volti al superamento dei limiti forti posti dalla standardizzazione, pur conservando i principi base di prefabbricazione, reversibilità, facilità e rapidità di assemblaggio dei componenti costruttivi.

9 Davis D., *A History of Parametric*, 2013 (<http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>).

10 Erioli A., *Il computer come design medium in Architettura*, in “INARCOS”, n. 734, Anno LXVIII, 4_2013, pp. 7-13.

Si avverte così il passaggio da un tipo di produzione standardizzata a una produzione che rimane comunque di massa ed economica, ma che si differenzia in elementi potenzialmente unici. In questo panorama, a livello internazionale, sta crescendo sempre maggiormente l'interesse verso la generazione di strutture architettoniche tridimensionali complesse, mutabili, adattabili, fluide e organiche.

In termini di produzione e prefabbricazione dei componenti dell'edificio, questi strumenti offrono la possibilità di superare i limiti di produzione standardizzata (come la produzione di un unico tipo di elemento costruttivo da adottare in tutto il fabbricato), optando per la configurazione di un'ampia famiglia di elementi costruttivi eterogenei che, generati a partire dallo stesso principio e conformati iterando lo stesso processo, al variare dei parametri in gioco, siano dotati di una certa similarità, seppur differenziati coerentemente in funzione delle specifiche peculiarità. In quest'ottica, si può parlare di progettazione di edifici "su misura".

Parte fondamentale di questo processo di connessione degli ambiti di concezione e realizzazione del progetto, ora strettamente correlati tra loro, è occupata dagli strumenti di fabbricazione e dalle macchine CNC a controllo numerico, che rendono possibile il collegamento diretto tra i software di progettazione parametrica e il prodotto finale, pronto da assemblare in opera. In questo modo, l'intero flusso progettuale viene controllato e dunque sistematizzato, secondo i parametri coinvolti stabiliti dall'operatore progettista durante la fase iniziale del processo.

Attualmente, la disposizione di sofisticati algoritmi e software parametrici consente di concepire modelli virtuali tridimensionali capaci di guidare macchine CNC a controllo numerico, le quali consentono la produzione dei componenti di strutture, involucri, e qualsiasi parte dell'edificio.

Questo approccio progettuale e produttivo si basa su innovativi processi CAD-CAM applicati all'architettura. Dalla definizione di un modello virtuale CAD (*Computer Aided Design*) si passa alla fabbricazione digitale CAM (*Computer Aided Manufacturing*)¹¹. Il modello è generato e gestito con software e tecnologie digitali CAD 3D e i parametri in ingresso regolano grandezze geometriche tra punti, linee, superfici e volumi.

Grazie all'implementazione di applicazioni aggiuntive e *plug-in* in grado di simulare il comportamento dei materiali scelti, la presenza di vincoli e l'interazione dell'oggetto del processo progettuale con sollecitazioni esterne, è possibile gestire e controllare l'eterogeneità dei fattori considerati durante tutto il flusso di lavoro. Analogamente, è possibile simulare e prevedere anche i vincoli posti dalla produzione e fabbricazione degli elementi, fin dalle prime fasi di concezione, rendendo così più fluido e breve il percorso tra idea e prodotto costruito.

Nell'ottica di una progettazione sempre più indirizzata verso la sostenibilità ambientale ed economica dei grandi interventi architettonici, risulta di grande interesse la possibilità di progettare

11 Frescaroli L., Leoni S., *Verso un'architettura parametrica. La progettazione di forme complesse: la mostra e il corso di alta formazione al Politecnico di Milano*, in "Architetti", numero 8-9 Agosto-Settembre 2010, p. 19.

e generare, tramite linee di codice (*scripting*) e algoritmi di fisica tecnica e tecnica delle costruzioni, in grado di ottimizzare le prestazioni energetiche e strutturali degli edifici.

Con il termine *scripting* si intende qualsiasi programma che permetta di generare algoritmi attraverso l'utilizzo di un linguaggio per l'iterazione di un processo e il controllo del flusso di dati da essa generati. Gli *scripting* si suddividono in due categorie, quelli *visual* e non, caratterizzati da gradi di personalizzazione, intuitività e accessibilità differenti.

Un particolare caso di *scripting*, relativo al software impiegato durante il progetto di ricerca per la determinazione della morfologia del sistema di involucro, riguarda *Grasshopper*, un *plug-in* di *visual scripting* applicato a *Rhinoceros*, un software CAD in grado di gestire geometrie NURBS¹². *Grasshopper* è un processore di dati in grado di gestire dati interfacciandosi con l'esterno, importare dati in ingresso e restituire dati in uscita sotto forma di oggetti visuali o dati numerici, tramite un'interfaccia grafica visuale e molto intuitiva per l'utenza. Le modalità di elaborazione dei dati e di visualizzazione grafica dei parametri coinvolti nel progetto, utilizzati da *Grasshopper*, permette la sempre maggior diffusione del suo utilizzo nel campo della progettazione parametrica.

Gli studi di modellazione e parametrizzazione condotti in ambito di ricerca dimostrano che la generazione di forme virtuali mediante l'utilizzo degli strumenti di progettazione parametrica apre un gran potenziale e nuove possibilità formali per il progetto. Il design parametrico consente infatti di sviluppare e realizzare architetture dalle geometrie complesse e una progettazione che integra forma, materia, struttura e ambiente. Al contempo, grazie al disegno computerizzato, l'analisi e la previsione dei processi, permettono la simulazione del comportamento prestazionale degli oggetti in corso di progettazione, e quindi l'anticipazione e il controllo dei fatti reali.

In particolare, la seconda soluzione innovativa di involucro proposta dal progetto di ricerca, elaborata e analizzata presso i laboratori dell'CIRI - Edilizia e Costruzioni, si basa sull'utilizzo dei software *Rhinoceros+Grasshopper* come strumenti per la progettazione parametrica.

SOFTWARE PARAMETRICO-VARIAZIONALE: *WOLFRAM MATHEMATICA*

Wolfram Mathematica è un linguaggio di programmazione, introdotto nel 1988, basato sulla scrittura di espressioni, le cui grandi potenzialità consentono di effettuare calcoli numerici e simbolici di grande complessità, e di rappresentare grafici di funzioni bi-tridimensionali con molteplici opzioni grafiche.

12 “Una geometria NURBS (*Non Uniform Rational Basis-Splines*) rappresenta una classe di elementi geometrici utilizzati in computer grafica, specialmente dai software CAD, per rappresentare curve e superfici. La potenzialità di questo semplice tipo di geometrie NURBS consiste nella possibilità di presentarsi come griglie dotate di un alto grado di modificabilità e controllo geometrico. In termini matematici, le curve NURBS sono una generalizzazione delle curve B-Spline e delle curve di Bézier, che sono particolari curve parametriche.” (Piegl L. A., Tiller W., *The NURBS book*, Springer-Verlag, New York 1966.)

Il software comprende la più grande collezione al mondo di algoritmi, una capacità di calcolo ad alte prestazioni, oltre che un potente motore di visualizzazione in un sistema fortemente coerente e sufficientemente accessibile in termini di accessibilità e facilità di utilizzo da parte dell'utenza. Questi fattori rendono intuitivo, veloce ed economico il processo di creazione di modelli di calcolo customizzati in funzione dell'utenza, rappresentando così lo strumento ideale per la ricerca di base e applicata, in qualsiasi settore.

Oltre ad essere rinomato per essere uno dei migliori software di calcolo a disposizione della didattica e della ricerca, *Mathematica* rappresenta l'unico ambiente di sviluppo dotato della piena integrazione della computazione nell'intero flusso di lavoro. Questa prerogativa esclusiva guida l'utilizzatore dall'idea iniziale allo sviluppo di soluzioni individuali o su larga scala.

Nel particolare ambito della ricerca strutturale ed architettonica, *Mathematica* viene di frequente impiegato durante la fase di ricerca morfologica, svolta secondo un approccio parametrico-variazionale. Attraverso la scrittura di funzioni e algoritmi, il software consente di creare in maniera molto precisa geometrie semplici e complesse, consentendone al contempo la rappresentazione secondo una visualizzazione grafica bi-tridimensionale (talvolta problematica e poco precisa).

Questo approccio è ampiamente utilizzato dal *Laboratoire GSA - Géométrie Architecture* di Parigi, che da anni si occupa di ricerche in ambito di architettura, con particolare sguardo verso la geometria e i suoi rapporti con la costruzione. La morfologia strutturale, che costituisce uno dei principali assi di ricerca del Laboratorio GSA, comprende lo studio e la modellazione di strutture architettoniche, focalizzandosi principalmente sugli aspetti geometrici e strutturali, come componenti fondatrici del linguaggio architettonico.

Questo tipo di studio delle strutture viene affrontato secondo un approccio geometrico e strutturale che risulta al contempo teorico, scientifico, storico e sperimentale, supportato dal software parametrico-variazionale *Wolfram Mathematica*, e successivamente da software di analisi meccanica in grado di interfacciarsi con questo, imprescindibilmente seguito da una validazione dei modelli attraverso la realizzazione di prototipi.

In particolare, la fase iniziale di studio della prima soluzione progettuale proposta dal progetto di ricerca, analizzato presso la sede di cotutela francese, viene svolta proprio tramite l'impiego di *Wolfram Mathematica* per la generazione geometrica e l'analisi morfologica del sistema di cubi autobloccanti.

II.3 SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA E PROTOTIPAZIONE

Il passaggio dalla fase ideativa alla sua traduzione in forma costruita avviene attraverso il momento della sua realizzazione, sulla base di un disegno preciso di progetto. La fase di sperimentazione costruttiva e prototipazione dei sistemi costruttivi proposti rappresenta la vera essenza del progetto di ricerca, come fase indispensabile per il raggiungimento della massima comprensione della tecnologia innovativa elaborata.

L'architettura esiste nel momento in cui viene realizzata: pertanto, essa non può essere concepita indipendentemente dalla sua materializzazione. Attraverso la fase finale di sperimentazione costruttiva e prototipazione, è possibile comprendere a fondo come gli aspetti qualitativi e quantitativi siano coinvolti e intimamente legati tra loro all'interno del processo progettuale.

Dato che tutte le sollecitazioni esterne sulle strutture comportano movimenti, e che tali risposte meccaniche costituiscono i risultati visibili di queste azioni, i modelli si prestano bene alla presentazione intuitiva dei concetti strutturali, dimostrando il comportamento strutturale di semplici elementi in modo più efficace di qualsiasi rappresentazione grafica.

Secondo questo approccio, la realizzazione di modelli reali risulta una fase fondamentale per la comprensione e la messa a punto delle modalità di posa in opera e montaggio, in rapporto alla facilità e rapidità, e alla verifica dell'esito finale, in termini di qualità estetico-architettoniche e di comportamento meccanico.

Il prototipo realizzato alla fine dell'iter progettuale rimane lo strumento di rappresentazione principale, sul quale simulare e testare il comportamento meccanico e termico della struttura concepita, al fine di valutarne il comportamento sotto l'azione di sollecitazioni esterne¹³.

¹³ Da queste riflessioni nasce l'idea di impostare il Laboratorio del corso di *Architettura Tecnica 1* del Corso di Studi in Ingegneria Edile-Architettura di Bologna, diretto dal Prof. Gulli, secondo questo approccio fondato sull'importanza di costruire modelli elementari, al fine di comprendere realmente, dal punto di vista qualitativo, i principi strutturali e costruttivi studiati durante i moduli teorici del corso. All'interno del corso di Architettura Tecnica 1, la parte di laboratorio figura come uno strumento di connessione delle conoscenze acquisite durante le ore di teoria, attraverso lo svolgimento di esperienze costruttive pratiche. Il laboratorio, infatti, prevede delle attività volte a favorire un approccio intuitivo, piuttosto che numerico, allo studio delle strutture. Uno degli strumenti più efficaci per sviluppare e raffinare l'intuito, nell'ambito delle strutture consiste nella sperimentazione diretta delle principali sollecitazioni studiate (in forma più matematica e numerica) durante il corso di Meccanica e Scienza delle Costruzioni. "L'intuito è un processo essenzialmente di sintesi, che porta alla improvvisa e diretta comprensione di idee dopo che sono state più o meno consciamente analizzate per un certo tempo. Esso costituisce una buona via alla conoscenza, purché siano rispettate due condizioni: che esso poggi su ampie esperienze precedenti, e che sia sottoposto ad accurata verifica." (M. Salvadori e R. Heller, *Le strutture in architettura*, Nuova edizione ampliata, ETASLIBRI, Milano 1992.M.) Durante la parte finale, che costituisce l'essenza del laboratorio, gli studenti si trovano per la prima volta a dover concretizzare il loro progetto, tanto dal punto di vista della concezione architettonica e strutturale, quanto nella realizzazione di un modello in scala, di dimensioni limitate, applicando i principi statico-costruttivi acquisiti durante le lezioni teoriche. Il plastico realizzato alla fine del percorso costituisce lo strumento di rappresentazione principale, sul quale simulare e testare il comportamento meccanico delle strutture realizzate, sotto l'azione di sollecitazioni esterne. La candidata Cecilia Mazzoli partecipa attivamente all'elaborazione del programma del corso, affiancando come tutor gli studenti durante tutte le fasi del laboratorio, a partire dalla fase metaprogettuale, fino allo svolgimento delle prove di carico.

L'intento di questa parte finale del progetto di Tesi è quello di presentare una delle possibili modalità nell'approccio didattico e di ricerca scientifica, nei confronti delle problematiche di progettazione di sistemi costruttivi innovativi, quali quelli rivolti all'involucro edilizio, consentendo di far emergere la potenzialità esemplificativa del percorso conoscitivo adottato e degli strumenti critici impiegati.

In linea con queste considerazioni, che rispecchiano un approccio all'Architettura Tecnica caratterizzato dall'unione profonda tra *teoria* e *prassi* del costruire, viene attribuita grande importanza al capitolo finale della *Parte I - Materiali e Tecniche*, comprendente la fase di analisi, progetto e prototipazione.

In particolare, il *Capitolo III. Sperimentazione costruttiva* si suddivide in due sottocapitoli, dedicati a due sperimentazioni costruttive differenti:

- la prima sperimentazione consiste nella realizzazione di un sistema di facciata costituito da cubi autobloccanti (*TIM - Topologically Interlocked Materials*), svolta presso i *Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau* (Villefontaine, Lione), in collaborazione con l'*ENSAPM - École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais*;
- la seconda sperimentazione consiste nella realizzazione di un sistema di facciata costituito da pannelli prefabbricati a maglia esagonale di contenimento per il materiale geopolimerico innovativo isolante termicamente (*G-SKinnED - Geopolymers-Sustainable Key for an innovative Envelope Design*), svolto in collaborazione con il *CIRI - Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna.

A conclusione del percorso svolto precedentemente, partendo dal rilievo metrico e descrittivo degli edifici esistenti, sulla base del quale svolgere l'attività di progettazione parametrica degli interventi di recupero, la fase di sperimentazione costruttiva assume il ruolo fondamentale di verifica delle possibilità applicative dei sistemi costruttivi di facciata proposti, e della appropriatezza delle considerazioni svolte in ambito teorico durante il percorso conoscitivo adottato.

II.4 VERIFICA PRESTAZIONALE E REQUISITI DI QUALITÀ COSTRUTTIVA

Le esperienze costruttive svolte per la realizzazione dei prototipi di facciata sono finalizzate non soltanto alla sperimentazione e alla traduzione delle scelte progettuali svolte, bensì anche alla realizzazione di modelli reali sui quali eseguire le prove di carico che consentono di valutare qualitativamente e quantitativamente le prestazioni energetiche e strutturali.

Una volta realizzati i modelli relativi ai sistemi di facciata, è possibile svolgere misurazioni, prove di carico e test di verifica prestazionale, meccanica e termica, al fine di caratterizzare il sistema costruttivo, definendone e verificandone le proprietà.

I valori riscontrati in seguito alle misurazioni dirette svolte sui prototipi devono essere confrontati con i dati ottenuti precedentemente, elaborati tramite i calcoli svolti durante la fase di simulazione e analisi meccanica e termica, costantemente rapportata con la fase di progettazione del sistema costruttivo.

Per i due sistemi costruttivi di facciata vengono impiegati metodi e software differenti per lo svolgimento delle analisi prestazionali, selezionati in funzione delle specificità del sistema tecnologico e del contesto all'interno del quale viene condotto l'approfondimento.

In particolare, si distinguono i seguenti strumenti di calcolo di analisi:

- per il primo sistema di facciata, costituito da cubi autobloccanti, viene impiegato il software di analisi meccanica e termica con il FEMDE - Metodo agli Elementi Finiti con Elementi Discontinui (*Cast3M 2000*);
- per il secondo sistema di facciata, costituito da pannelli prefabbricati a maglia esagonale, vengono impiegati software di calcolo termico in regime stazionario (*GemaVap 4.3*) e dinamico (*DesignBuilder+EnergyPlus*).

Valutando il grado di rispondenza tra i dati ottenuti dalle analisi preliminari svolte sui modelli virtuali e i risultati ricavati dalle misurazioni dirette sui modelli reali dei sistemi di facciata, è possibile stabilire l'appropriatezza delle scelte progettuali compiute, il grado di validità delle tecnologie proposte e, di conseguenza, l'adequazione dell'approccio innovativo proposto dal progetto di ricerca per la progettazione di interventi di riqualificazione architettonica ed efficientamento energetico del costruito.

L'obiettivo principale perseguito da questo progetto di ricerca consiste dunque nell'illustrazione di un approccio metodologico valido di analisi e progetto, perseguibile all'interno di un ambito così complesso come quello degli interventi di Recupero del patrimonio edilizio esistente.

III. Sperimentazione costruttiva
Expérimentation constructive

INTRODUZIONE

All'interno di questo capitolo vengono esposte le due esperienze progettuali svolte nell'ambito del progetto di ricerca, come coronamento del processo proposto per lo svolgimento di interventi di recupero del patrimonio edilizio esistente mediante addizione volumetrica in facciata. I due sistemi costruttivi illustrati di seguito figurano essenzialmente a titolo esemplificativo del processo progettuale approfondito.

I due sistemi innovativi di involucro proposti si differenziano sostanzialmente per le caratteristiche geometriche e le proprietà fisiche dei componenti di facciata impiegati e, di conseguenza, per i comportamenti prestazionali raggiungibili mediante la loro posa in opera, per la realizzazione di una seconda pelle per gli edifici esistenti.

Come si vedrà meglio in seguito, infatti, mentre il I Sistema di involucro, studiato presso il Laboratoire GSA dell'ENSAPM - Paris-Malaquais, è basato sull'assemblaggio a secco di elementi cubici autobloccanti *TIM (Topologically Interlocked Materials)*, il II Sistema di involucro, sperimentato presso il CIRI - Edilizia e Costruzioni dell'Università di Bologna, prevede la posa in opera a secco di pannelli di facciata prefabbricati *G-SKinnED (Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design)*.

Entrambi i sistemi innovativi di involucro sono stati elaborati a partire dai medesimi paradigmi di ricerca e, pertanto, cercano di dare una risposta efficace ai requisiti posti dalle normative vigenti e dalle esigenze dell'utenza. Inoltre, i sistemi presentati sono accomunati da alcune caratteristiche fondamentali che ne caratterizzano le proprietà principali in termini di tecniche costruttive impiegate, di continuità del disegno di superficie e, quindi, di continuità del sistema di involucro, così come in relazione alle proprietà fisiche e termiche del materiale isolante previsto per entrambe le soluzioni.

In particolare, le due soluzioni innovative di involucro sono accomunate dall'applicazione di una tecnica a secco basata sull'assemblaggio di elementi prefabbricati, dall'adozione di una trama esagonale per la tassellazione della nuova superficie di facciata e dall'utilizzo del medesimo materiale termicamente isolante, plastico e inorganico, recuperato e riciclato, ecosostenibile e a basso impatto ambientale.

All'interno del presente paragrafo introduttivo, si ritiene opportuno fornire una serie di informazioni in merito a questi fattori che accomunano i sistemi innovativi di involucro elaborati all'interno del progetto, al fine di inquadrare le istanze e i paradigmi di ricerca che costituiscono il contesto in cui si inseriscono le indagini e le sperimentazioni svolte.

Di seguito, vengono quindi trattate le seguenti tematiche:

- **caratterizzazione del materiale innovativo AAM (*Alkali Activated Material*);**
- **tassellazione dello spazio (*Tiling*).**

CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE INNOVATIVO AAM (ALKALI ACTIVATED MATERIAL)

La selezione di questo materiale isolante innovativo si fonda sulla preliminare analisi termica di un ampio repertorio di soluzioni tradizionali di involucro per la riqualificazione energetica degli edifici, condotta all'interno di un più ampio lavoro di ricerca volto alla definizione dei parametri richiesti per un materiale dotato di buone prestazioni termiche, in termini di conducibilità e di inerzia termica. In questo ambito, sono state condotte simulazioni energetiche mediante software di analisi in regime stazionario, al fine di rappresentare matematicamente il comportamento termo-fisico dei pacchetti costruttivi di involucro selezionati, al variare del tipo di isolante e dello spessore del suo strato, per valutare la soluzione di intervento migliore da adottare in fase progettuale.

Il software di simulazione energetica impiegato per svolgere queste indagini (*GemaVap 4.3*) opera in regime stazionario e, dunque, basa i propri calcoli sul periodo più rappresentativo dell'anno, in termini di temperatura. Inoltre, come ogni software di simulazione, si basa su una serie di ipotesi di partenza che dipendono dalle impostazioni di default del programma e che possono inevitabilmente pregiudicare, seppur lievemente, l'accuratezza dei risultati. Ad esempio, fra i vari fattori che possono influire sul risultato finale della simulazione, occorre tenere in considerazione che il clima reale può non coincidere con i dati meteorologici disponibili nella libreria di dati offerta dal software, che gli impianti termici possono avere dei carichi di lavoro reali diversi da quelli previsti dalle curve di funzionamento a carico parziale, e che nell'ambiente simulato viene trascurato il reale peggioramento prestazionale degli impianti con il tempo.

Le indagini preliminari alla scelta del materiale isolante si sono focalizzate sull'analisi termica delle più comuni soluzioni tradizionali di involucro edilizio, ciascuna delle quali è stata accoppiata a isolanti diversi, di spessore variabile, al fine di evidenziare le proprietà termiche salienti dei materiali isolanti tradizionali e di individuare le caratteristiche ideali da ricercare nel materiale innovativo oggetto di ricerca, a base di AAM¹.

In prima istanza, sono state analizzate le proprietà delle tradizionali tipologie costruttive, costituenti le soluzioni più comuni di involucro degli edifici oggetto di riqualificazione: murature in mattoni pieni e semipieni a doppia e tripla testa, murature monostrato in blocchi forati e semipieni, a pareti a cassa vuota, pareti ventilate, pareti in cemento armato, pareti in blocchi forati di calcestruzzo. Per ognuna di queste tipologie di chiusura, sono stati valutati i parametri termici principali, senza l'aggiunta di uno strato isolante, al fine di comprendere quale tipo di intervento sia necessario per determinarne un miglioramento prestazionale. La valutazione quantitativa è svolta considerando i parametri di massa superficiale [kg/m^2], trasmittanza periodica [$\text{W/m}^2\text{K}$], sfasamento [h] e

¹ Tale analisi preliminare è stata svolta nel contesto di ricerche parallele in ambito di prestazioni energetiche degli edifici. In questa sede sono riportati soltanto gli esiti finali e le considerazioni finali di queste valutazioni energetiche, come guida per lo studio e l'esplorazione del materiale isolante innovativo individuato dalla ricerca.

smorzamento [-], in riferimento alle attuali normative. Nello specifico, la massa superficiale deve essere superiore ai 230 kg/m² o, in alternativa, la struttura deve rientrare almeno nella classe III della certificazione energetica della Regione Emilia Romagna. Inoltre, secondo il *D.lgs 29 dicembre 2006, n. 311*, la trasmittanza non deve essere superiore a 0,34 W/m²K, e lo sfasamento deve essere pari ad almeno 8 h, mentre il valore limite dello smorzamento è di 0,4.

In secondo luogo, è stata condotta l'analisi termica delle varie stratificazioni ottenute accoppiando a queste tipologie costruttive diversi tipi di isolanti termici tradizionali, con spessori variabili: XPS, EPS, EPS con grafite, lana di roccia, lana di vetro, fibra di legno, fibra di canapa, sughero, vetro cellulare. Per ognuna di queste combinazioni, mediante il software di simulazione impiegato, oltre ai valori trasmittanza stazionaria U e periodica Y_{IE} , è stato possibile calcolare il fattore di decremento o attenuazione f_d , e lo sfasamento, che determinano come viene trasformata l'onda termica durante il passaggio attraverso la struttura. Secondo la norma UNI EN ISO 13788, la pressione in corrispondenza della superficie interna deve essere inferiore all'80% della pressione di saturazione: pertanto, considerando i dati climatici mensili della provincia considerata e le condizioni dell'ambiente interno (classe di concentrazione di vapore, temperatura interna, umidità relativa, ricambio d'aria, produzione di vapore), è stata calcolata la temperatura superficiale interna che verifica tale condizione imposta dalla norma e, da questa, il fattore di temperatura. Eseguendo il calcolo minimo per tutti i mesi della stagione di riscaldamento e per il mese critico dell'anno, ossia quello caratterizzato da un fattore di temperatura massimo, si ricava la resistenza minima che la struttura deve avere affinché non si presenti condensa superficiale. Un altro fattore fondamentale consiste nella condensa interstiziale, valutata dalla stessa norma UNI EN ISO 13788, attraverso il metodo di Glaser, al fine di evitare che la presenza di un alto tasso di umidità fra i diversi strati possa determinare un deterioramento delle strutture. Nello specifico, durante la verifica, si considera la formazione di condensa fra gli strati ogni volta che la pressione di vapore supera la pressione di saturazione: se si verifica condensa interstiziale durante qualche mese dell'anno, la soluzione progettuale può essere accettabile, soltanto a condizione che tutta la condensa evapori prima del successivo periodo invernale e che la condensa accumulata non superi il valore limite di 500 g/m². In accordo con il *D.lgs n. 311*, in assenza di un sistema di controllo dell'umidità interna, le condizioni interne da assumere per il calcolo corrispondono a una temperatura interna pari a 20 °C e un'umidità relativa pari al 65%.

Al termine di queste analisi, è stato possibile trarre alcune conclusioni importanti in merito alle caratteristiche prestazionali del materiale isolante più idoneo per la riqualificazione energetica dei fabbricati esistenti, mediante un sistema di isolamento termico esterno a cappotto. In particolare, si è dimostrato che gli spessori più adeguati degli isolanti tradizionali considerati per ottenere le trasmittanze verificate si attestano sui fra gli 8 e i 10 cm, con alcune eccezioni per il vetro cellulare e il sughero, che rendono verificate le strutture per spessori fra i 12 e i 14 cm. A livello di forma-

zione di condensa interstiziale, invece, si è dimostrato che essa si presenta in quantità superiori al limite imposto di 500 g/m^2 nel caso di isolante in lana di roccia e lana di vetro, con spessori fra gli 8 e i 10 cm, e nel caso di isolante in fibra di canapa con spessore di 10 cm; in tutti gli altri casi considerati, invece, la condensa interstiziale è spesso presente, ma in quantità inferiore al limite, dunque accettabile.

I dati emersi dalle simulazioni hanno contribuito a delineare, durante la fase preliminare alle ricerche in ambito di tecnologia dei materiali, il profilo del materiale isolante ricercato nel presente progetto di ricerca, idoneo allo svolgimento degli interventi di recupero dell'edilizia recente mediante sistemi innovativi di involucro. Così come dimostrano i dati raccolti, l'isolante termico impiegato deve verificare i valori di trasmittanza imposti dalla normativa attuale vigente per spessori compresi fra gli 8 e i 14 cm. Inoltre, in termini di formazione di condensa interstiziale, trattandosi di uno dei fattori maggiori di vulnerabilità in ambito di riqualificazione dell'involucro, l'isolante termico impiegato deve presentare un comportamento efficace nel duplice caso di applicazione sul lato esterno e interno della parete perimetrale esistente, senza necessitare dell'ausilio di un impianto di ventilazione meccanica forzata (come può avvenire per il vetro cellulare), e senza raggiungere livelli di condensa interstiziale inaccettabili (come accade per le lane minerali).

In conclusione, il materiale isolante ricercato nell'ambito del presente progetto, in quanto considerato idoneo per lo svolgimento di interventi di recupero su fabbricati recenti, deve presentare le seguenti caratteristiche: buone proprietà di versatilità per uso esterno e interno; buona igroscopicità, paragonabile a quella della fibra di legno; buoni valori di densità, paragonabili a quelli di un materiale sintetico come l'EPS o l'XPS; elevata riciclabilità ed ecosostenibilità, in termini di quantità di energia grigia inglobata nel prodotto e ridotto impatto ambientale.



[Fig. 1] Polvere di mattone, derivata da scarti di lavorazione riciclati, usata come materia prima per la realizzazione di un materiale AAM a base ceramica.



[Fig. 2] Mattone riciclato, ottenuto dal riutilizzo di polvere di laterizi (*BR - Brick Waste*) impiegati come precursori per l'avvio del processo di attivazione alcalina.

Sulla base di queste analisi si è fondata la ricerca sperimentale nel campo della tecnologia dei materiali svolta presso il CIRI Edilizia e Costruzioni, in virtù dei grandi potenziali individuati nel riutilizzo delle polveri di laterizio, al fine di realizzare un materiale isolante innovativo che presentasse tali requisiti prestazionali e ambientali: *AAM - Alkali Activated Materials* a base ceramica [Fig. 1, 2].

Gli AAM rappresentano una nuova classe di materiali di origine inorganica, derivati dal processo di attivazione alcalina di precursori prevalentemente di origine calcio-allumino-silicatica. Grazie all'aggiunta di soluzioni fortemente alcaline, queste materie prime sono in grado di consolidarsi a temperatura ambiente o comunque a temperature modeste, comprese tra i 20 e i 100°C, con significativi benefici in termini di riduzione dell'emissione di CO₂ dovuta alle elevate temperature che spesso devono essere raggiunte per ottenere materiali edili.

Quando le materie prime impiegate per realizzare gli AAM sono di natura principalmente allumino-silicatica (quali il metacaolino, derivato dal caolino calcinato), i prodotti che si ottengono sono noti con il nome di *geopolimeri*. L'interesse per questa nuova classe di materiali è dovuto al fatto che per ottenerli si possono utilizzare diverse tipologie di scarti industriali come precursori, e che il processo produttivo presenta un basso impatto ambientale, se confrontato con i processi dei materiali tradizionalmente impiegati nel settore edile. Inoltre, i prodotti ottenuti via attivazione alcalina possono essere utilizzati sia come matrici leganti per la realizzazione di compositi e conglomerati (analogamente al cemento), sia come materiali per la realizzazione di blocchi e lastre, anche per usi ad alta temperatura².

Generalmente, la struttura di un geopolimero alcalinamente attivato si forma per policondensazione dell'allumina e della silice a temperature comprese tra i 60 e i 90°C, con un controllato contenuto d'acqua. Le potenziali applicazioni di questi materiali dipendono principalmente dal rapporto delle quantità in cui sono presenti Silicio e Alluminio, che possono variare in funzione delle prospettive di utilizzo [Fig. 3].

I geopolimeri sono caratterizzati da una struttura tetraedrica in cui l'ossido di Silicio SiO₃ e l'ossido di Alluminio AlO₄ sono connessi da un atomo di ossigeno. La struttura del geopolimero comprende tre classi di polimeri inorganici che dipendono dal rapporto silice/allumina, e si basa su tre differenti monomeri di base:

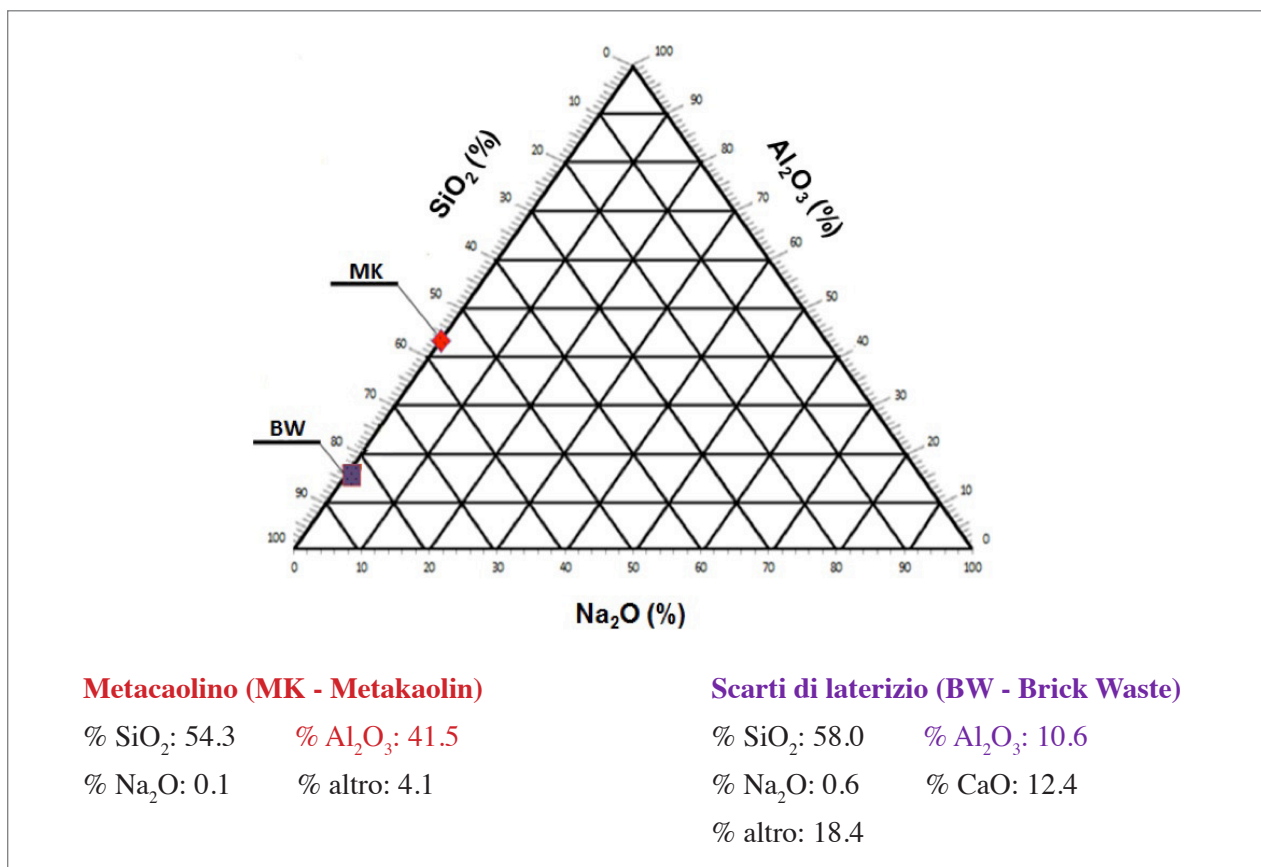
1. Polisialato (PS): unità ripetitiva [-Si-O-Al-O-], con SiO₂/Al₂O₃ = 2;
2. Polisiilossosialato (PSS): unità ripetitiva [-Si-O-Al-O-Si-O-], con SiO₂/Al₂O₃ = 4;
3. Polidisiilossosialato (PSDS): unità ripetitiva [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-], con SiO₂/Al₂O₃ = 6.

All'interno di questa classificazione, la desinenza *-sialato* rappresenta l'abbreviazione di silico-osso-alluminato.

² Bignozzi M.C., Manzi S., Lancellotti I., Kamseu E., Barbieri L., Leonelli C., *Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag*. in "Applied Clay Science" n. 73, 2013, pp. 78-85.

In sintesi, per realizzare un geopolimero sono necessarie tre principali componenti: materie prime allo stato grezzo come silicoalluminati naturali o di scarto industriale, una soluzione alcalina e un componente riempitivo (*filler*) inattivo. La soluzione alcalina, ottenuta mescolando una soluzione di idrossidi di metalli alcalini con una soluzione di sodiosilicati (*waterglass*), discioglie i silicoalluminati e ha funzione di attivatore, legante e plasticizzante. L'aggiunta del *filler*, generalmente costituito da caolino e metacaolino, serve a incrementare la quantità di ioni Al_3^+ qualora la quantità presente nei materiali grezzi non sia sufficiente alla formazione del geopolimero. La sua aggiunta determina la riduzione della reattività della miscela, incrementando il tempo di reazione tra i silicoalluminati e l'attivatore alcalino, oltre che l'aumento della resistenza meccanica, e la diminuzione della porosità e della permeabilità del prodotto.

Da quando il concetto di geopolimero è stato introdotto nella comunità scientifica negli anni Settanta, si è affermato che questi materiali, e nello specifico quelli prodotti da argille naturali termicamente trattate come il metacaolino, presentano una stabilità strutturale alle alte temperature, associata ad una struttura simil-ceramica con un alto punto di fusione.



[Fig. 3] Diagramma ternario $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2$ rappresentante la composizione chimica, in termini di ossidi, dei materiali AAM: in rosso è rappresentata la composizione dei Metacaolini (MK) e in viola quelle dei Mattoni riciclati (BW).

Nonostante questo, diversi studi in letteratura dimostrano che per tali geopolimeri a base di metacaolino, esposti a temperature elevate (intorno ai 200°C), si verifica una consistente perdita delle proprietà meccaniche che ne limita l'uso esclusivamente ad applicazioni in cui non sia richiesta un'alta stabilità volumetrica. In ogni caso, l'aggiunta di eventuali *filler* agisce a favore della riduzione dei fenomeni di deformazione del materiale geopolimerico, aumentandone la resistenza a rottura.

Gli AAM sono quindi una nuova classe di materiali termicamente isolanti con eccellenti proprietà termofisiche, non infiammabili e non inquinanti, quindi non pericolosi per l'uomo e l'ambiente: per questo, la tecnologia di geopolimerizzazione viene annoverata fra le cosiddette *Green Technology*. In molti paesi, questo tipo di materiali ha già trovato una concreta applicazione nel settore delle costruzioni, soprattutto per il rinnovato interesse verso il risparmio energetico e la conseguente tendenza a sostituire progressivamente i prodotti di matrice cementizia con materiali ecologici.

Il settore delle costruzioni si presta alla maggior parte delle applicazioni di questi materiali, quali la realizzazione di rivestimenti ignifughi su metallo o cemento, grazie alle favorevoli proprietà di resistenza al fuoco, o ancora come materiali isolanti per sistemi a cappotto e rivestimenti esterni di facciata. Le potenziali applicazioni di questi materiali non dipendono solo dalla loro struttura intrinseca, ma anche dalla composizione chimica dei materiali minerali di partenza e dall'estensione della reazione di geopolimerizzazione. Pertanto, si avranno proprietà variabili a seconda che l'AAM sia ottenuto da materiale inorganico vergine (crudo), da polvere di materiale di scarto (già sottoposto a un processo di cottura) o ancora da ceneri volanti.

Il progetto di ricerca propone un particolare tipo di materiale AAM, dal carattere del tutto innovativo, nella duplice forma di malta derivata da argilla vergine e malta derivata da polveri di laterizio riciclato proveniente da scarti di lavorazione. In ogni caso, si tratta di un materiale plastico, inorganico ed ecosostenibile, dotato di buone proprietà termiche isolanti, idoneo per la realizzazione di un nuovo sistema di involucro per l'efficientamento energetico dell'edilizia recente.

Le prime sperimentazioni costruttive, effettuate durante la fase iniziale del percorso di ricerca, hanno portato alla realizzazione di misurazioni e test su provini di AAM, ottenuto dall'unione di polvere di laterizio e soluzioni attivanti alcaline³, conducendo alla formulazione di un materiale dotato di una densità pari a 1,8 g/cm³, e con una conducibilità termica pari a circa 0,20 W/m.K. Alla luce di tali valori e delle analisi condotte, enunciate sopra, risulta evidente la necessità di introdurre nella formulazione del materiale un agente aerante che consenta di abbassare la densità fino a 0,1 g/cm³ (valore paragonabile a quello dei calcestruzzi alveolari) e di migliorarne i valori di conduci-

3 Componenti chimiche comprese nella prima formulazione del materiale AAM: Argilla cotta in polvere BWP - Brick Waste Powder (derivata da sfridi di lavorazione del laterizio), Silicato di Sodio in soluzione Na₂SiO₃, Idrossido di Sodio in soluzione 8M NaOH, α -Allumina Al₂O₃, Acqua distillata H₂O.

bilità termica fino a 0,05 W/m.K, rendendo il materiale competitivo con altri isolanti tradizionali attualmente in commercio.

La sperimentazione costruttiva procede dunque in questo senso, verso la definizione di un materiale isolante che, coerentemente con le istanze di ricerca, presenti le seguenti proprietà:

- inorganico, a base di argilla;
- plastico, e dunque dotato di un'ottima versatilità applicativa;
- riciclato, in quanto può essere ottenuto anche dal recupero degli scarti di lavorazione laterizi;
- ecosostenibile e a basso consumo di energia, poiché ottenuto da un processo di attivazione alcalina svolto a temperatura ambiente, che consente di abbattere i costi di cottura ad alte temperature;
- a bassa energia inglobata (*low embodied energy*).

In definitiva, ci si riferisce a un prodotto finale corrispondente a un materiale termico isolante geopolimerico AAM caratterizzato dai valori seguenti: densità $d = 200 \text{ kg/m}^3$, coefficiente di conducibilità $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, calore specifico $c_s = 1.080 \text{ J/kgK}$, coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo $\mu = 5$, resistenza meccanica a compressione $R_c = 3,5 \text{ MPa}$.

Precedentemente alla sperimentazione costruttiva, durante la fase di analisi teorica, il comportamento di questo materiale innovativo viene studiato mediante l'utilizzo di un software di simulazione in regime stazionario, al fine di dimostrare l'effettiva validità del suo utilizzo come sistema di isolamento a cappotto per spessori tradizionali di circa 10 cm, nel rispetto dei limiti imposti dalla normativa vigente.

TASSELLAZIONE DELLO SPAZIO (*TILING*)

Per tassellazione di un piano si intende la divisione regolare del piano euclideo mediante un'infinita serie di poligoni assemblati che lo ricoprano interamente, affinché ciascun lato di ogni poligono appartenga anche a quello di un altro poligono. In termini geometrici, questo tema si presenta come la *Teoria delle Tassellazioni*, che tratta la problematica di ricoprire un intero piano, considerato limitato, con tasselli riconducibili a un numero finito di forme predeterminate, senza che questi si sovrappongano o lascino spazi vuoti.

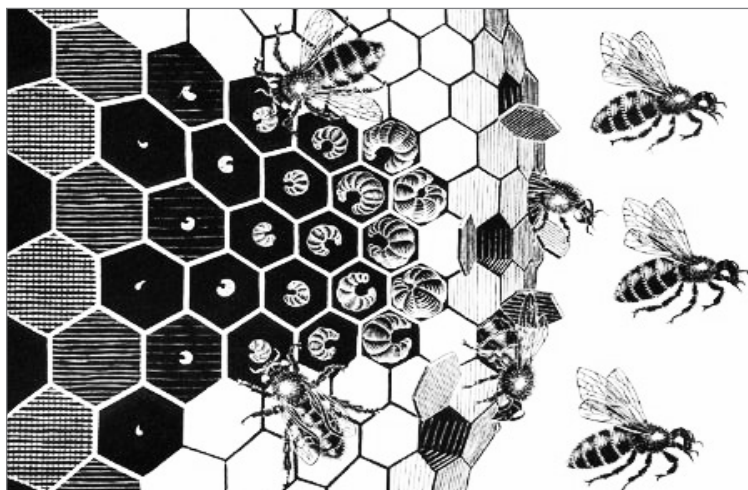
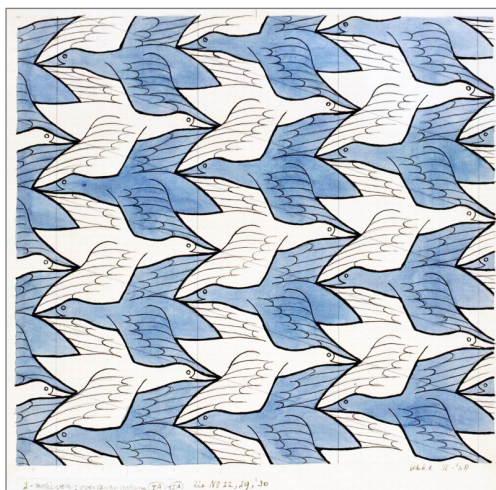
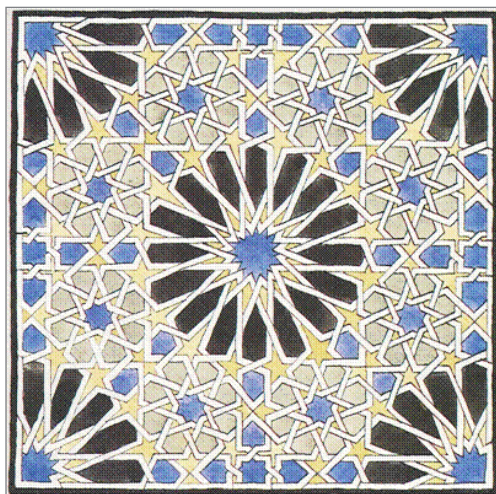
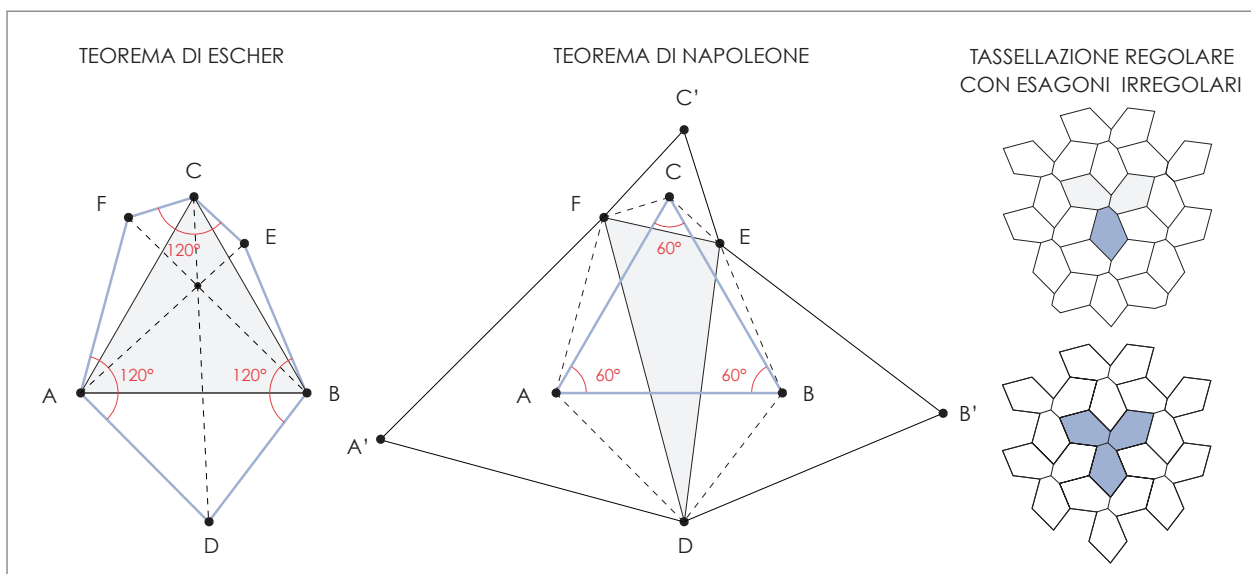
Fra le diverse pavimentazioni possibili, si definisce *regolare (o periodica)* quella tassellazione che presenta un preciso ordine geometrico, costituita da una aggregazione di tasselli simili, analoghi e uniformi a un motivo base (poligono o figure con lati parzialmente o totalmente curvilinei), che viene traslato lungo due direzioni distinte del piano.

Questo tipo di tassellazione può essere ottenuta mediante la composizione di un unico tassello identicamente ripetuto (tassellazione *regolare monoedrale*) oppure di due o più tasselli poligonali differenti (tassellazione *semiregolare*). Esistono soltanto otto possibili casi di tassellazione *semiregolare* di piano, che utilizzano la combinazione di soltanto alcune delle figure geometriche elementari: triangoli, quadrati, esagoni, ottagoni e dodecagoni [Fig. 9].

Per quanto riguarda le tassellazioni regolari monoedrali, mentre per i poligoni non convessi la problematica della pavimentazione dello spazio euclideo è considerata ancora non completamente definita, per i poligoni convessi è possibile distinguere in pavimentazioni di figure geometriche elementari regolari e irregolari.

Tra le figure geometriche regolari, esistono soltanto tre possibili geometrie base di tassellazione regolare monoedrale: triangoli, quadrati ed esagoni. Il motivo risiede nel fatto che, per suddividere un piano in poligoni, la somma degli angoli attorno a ogni vertice deve essere di 360° . Pertanto, nel caso di una tassellazione regolare, possono rispondere a questa funzione soltanto i poligoni aventi un numero di lati sottomultiplo di 360. Di conseguenza, si dimostra che nessun poligono convesso dotato di sette o più lati può pavimentare il piano senza lasciare spazi vuoti.

Considerando invece le figure geometriche irregolari convesse, esistono quattordici tipi di pentagoni, tre tipi di esagoni, e almeno quattordici tipi di pentagoni che tassellano interamente il piano, ognuno secondo modalità definite da un insieme di condizioni poste sugli angoli e sulle lunghezze dei lati. Numerosi studi in questo ambito sono stati svolti da matematici o da personalità estranee al settore, degne di nota per le loro scoperte in ambito geometrico: grazie a queste rivelazioni scientifiche, essi hanno contribuito a definire le innumerevoli proprietà di questa particolare classe di figure geometriche nell'ambito della tassellazione dello spazio, con innegabili influenze positive sul progresso di tutti gli altri campi che inevitabilmente fanno ricorso a queste leggi geometriche di ottimizzazione dello spazio (architettura, ingegneria, industria, design).



[Fig. 4] Comparazione delle analogie tra Teorema di Escher e Teorema di Napoleone.

[Fig. 5, 6] Motivi decorativi dell'Alhambra di Granada: (da sinistra) schizzo di Escher di una parte di mosaico murale (1922); fotografia di un dettaglio decorativo.

[Fig. 7, 8] Opere di Escher: (da sinistra) *Divisione regolare del piano n. 22* (1938); *Metamorphosis III-Excerpt 3* (1967).

A questo proposito, l'artista olandese M. C. Escher indaga le proprietà delle tassellature del piano euclideo realizzate con un particolare esagono descritto nel 1923 dal matematico F. Haag, per poi enunciare il *Teorema di Escher* sui triangoli nel 1941 [Fig. 4]. L'artista dimostra, anche se soltanto per via grafica, che è possibile ricoprire interamente un piano mediante una tassellazione regolare basata sulla ripetizione infinita di un esagono ADBECF, costruito partendo dal triangolo equilatero ABC, dal quale si traccia una retta AF di lunghezza e direzione arbitrarie, e infine si individuano i restanti due vertici D ed E seguendo le seguenti relazioni:

$$\begin{array}{ll} AD=AF & \angle FAD=120^\circ \\ BD=BE & \angle DBE=120^\circ \\ CE=CF & \angle ECF=120^\circ \end{array}$$

Il contesto geometrico in cui si inserisce il Teorema di Escher è analogo a quello del *Teorema di Napoleone* di geometria dei triangoli, all'inizio del 1800, che afferma che i baricentri dei triangoli equilateri costruiti esternamente sui lati di un triangolo qualsiasi formano un triangolo equilatero [Fig. 4].

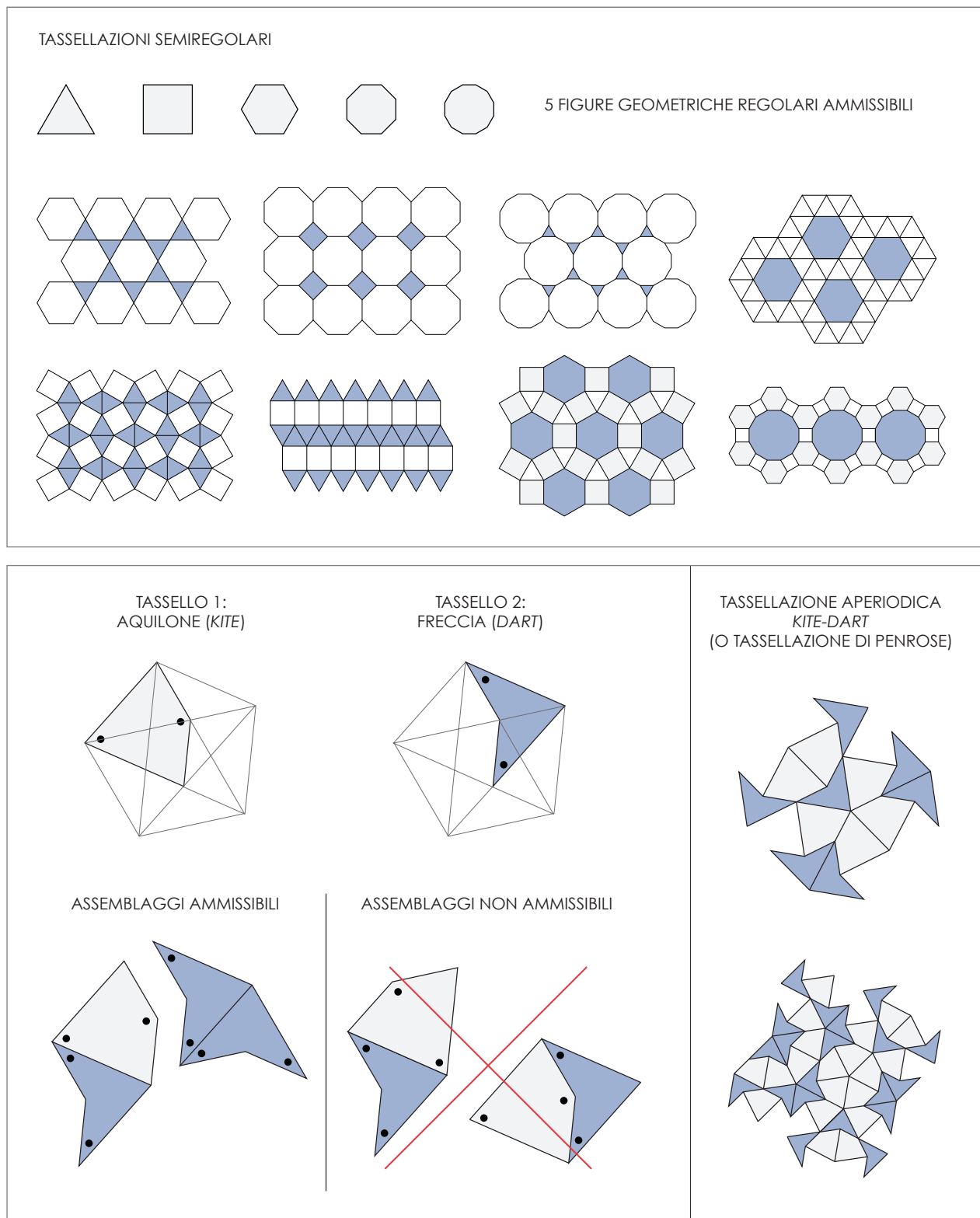
Considerando entrambi i teoremi, risulta immediato constatare che, partendo dall'esagono deformato di Escher ADBECF, e realizzando la costruzione enunciata dal Teorema di Napoleone a partire dal triangolo DEF, i punti A, B, C risultano essere i baricentri dei triangoli equilateri costruiti rispettivamente sui lati DF, DE, EF del triangolo di partenza: pertanto, per il Teorema di Napoleone, anche il triangolo ABC risulta equilatero.

Evidentemente, nel contesto della comunità matematica era già noto da molti anni l'enunciato di Escher, ma ciò che sorprende è la capacità intuitiva dell'artista di collegare le proprietà geometriche dei triangoli con le teorie di tassellazione esagonale dello spazio euclideo.

Escher afferma che “il ricoprimento periodico è la più ricca fonte di ispirazione che abbia mai incontrato, ancora ben lungi dall'essere esaurita” [Fig. 7], pur essendo la tipologia più semplice di tassellazione⁴. Infatti, le precise leggi matematiche che regolano le tassellazioni regolari, basate sul concetto geometrico di simmetria, affasciano enormemente l'artista che, da queste prime riflessioni, comincia ad approfondire l'esplorazione di questo vasto mondo.

L'esigenza di Escher di organizzare con regolarità la superficie spaziale da incidere o ricoprire con disegni si rivela fin dall'inizio della sua produzione artistica, come dimostra la copia della piastrella dalla complessa decorazione geometrica, che lo aveva impressionato durante la sua prima visita all'Alhambra di Granada nel 1922 [Fig. 5, 6]. Con il secondo soggiorno in Andalusia, il

4 Grasselli L., Costa A. F., *Le forme della simmetria: dai mosaici dell'Alhambra ai mondi di Escher*, in Bussagli M., Giudiceandrea F., Grasselli L. (a c. di), “L'enigma di Escher. Paradossi grafici tra arte e geometria”, Skira, Milano, 2013, pp. 33-53.



[Fig. 9] Unici otto casi possibili di tassellazione semiregolare dello spazio euclideo, ottenuti dall'assemblaggio di due o più differenti figure geometriche regolari elementari (triangoli, quadrati, esagoni, ottagoni e dodecagoni).

[Fig. 10] Tassellazione aperiodica *Kite-Dart* di Penrose, costituita dall'assemblaggio di due tasselli differenti, nel rispetto di precise regole di accostamento degli elementi.

suo interesse per la tassellazione dello spazio acquista ulteriore consistenza, e viene approfondito progressivamente in termini di controllo formale, sistematicità e organicità, fino a giungere alle espressioni più virtuose di geometrie complesse, non euclidee, tridimensionali, “impossibili” (celebri scale rovesciate di Escher, nastri di Moebius, triangoli di Penrose). [Fig. 8]

Alla base della teoria di tassellazione periodica dello spazio euclideo, risiede il concetto di invarianza rispetto alle isometrie, legato a quelle trasformazioni del piano euclideo che non alterano la distanza tra punti corrispondenti, suddividendosi in quattro possibili categorie: traslazioni, rotazioni, riflessioni, glissoriflessioni (combinazione di riflessione e traslazione).

Infine, esiste ancora un tipo di tassellazione *irregolare (o aperiodica)*, caratterizzata da una composizione di tasselli che non contiene alcuna trasformazione di traslazione.

L'esempio più noto è dato dalle tassellazioni di R. Penrose, generalmente costituite dall'assemblaggio di un insieme ampio di differenti figure geometriche basate sulla sezione aurea⁵, componibili secondo diversi accostamenti e diverse trasformazioni del piano euclideo. Ad esempio, una delle pavimentazioni aperiodiche di Penrose più utilizzate è la *Tassellazione Kite and Dart*, costituita dalla composizione di due tasselli: quello a forma di “aquilone” (*kite*) è un quadrilatero convesso caratterizzato da tre angoli interni di 72° e uno di 144°, mentre quello a forma di “vela” (*dart*) è un quadrilatero non convesso definito da due angoli interni di 36°, uno di 72° e uno di 216°. Entrambi i tasselli sono ottenibili a partire da un pentagono regolare e possono essere assemblati nel rispetto di poche semplici leggi geometriche, secondo diverse modalità [Fig. 10].

Ad esempio, uno degli approcci suggerisce di individuare (ad esempio con un pallino nero) i due vertici opposti dell'aquilone di angolo 72° e 144°, e i due vertici della freccia di 36° e di procedere ad accoppiare i tasselli facendo coincidere i lati di uguale lunghezza, e affiancando i vertici individuati precedentemente, in modo tale che nessuna coppia costituisca un singolo parallelogramma. A partire da questa coppia di elementi base, rispettando questa semplice regola, esiste una quantità infinita di modi per tassellare interamente un piano infinito. In questo tipo di tassellazioni, definite da R. Penrose e R. Ammann nel 1974, tra gli elementi non esiste mai simmetria traslazionale, bensì soltanto rotazionale e assiale: pertanto si può parlare di aperiodicità, in quanto lo schema base non si ripete mai identicamente.

Lo studio delle tipologie di tassellazione dello spazio e l'acquisizione del vasto repertorio di forme utilizzabili per generare disegni modulari di superficie risulta fondamentale per l'elaborazione di geometrie per le superfici di involucro edilizio.

5 Nell'ambito matematico, la *sezione aurea (o rapporto aureo)* indica il rapporto fra due lunghezze disuguali, tra cui la maggiore è medio proporzionale tra la minore e la somma delle due. Esprimendo questo concetto tramite una formula, se a è la lunghezza maggiore e b quella minore, si ha che: $b:a = a:(a+b)$. Analogamente, esiste lo stesso rapporto anche tra la lunghezza minore e la loro differenza: $a:b = b:(a-b)$. Pertanto, si può dire che per i segmenti vale la relazione seguente: $(a+b)/a = a/b = b/(a-b)$. Il rapporto tra i segmenti a/b vale approssimativamente 1,6180.

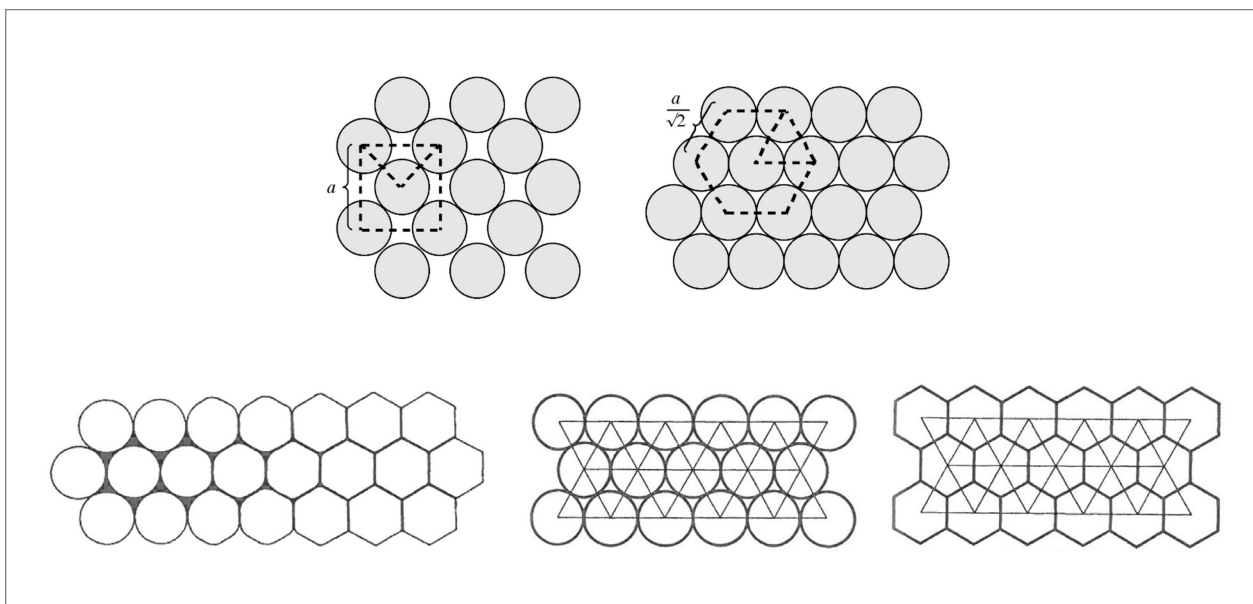
Infatti, la problematica della suddivisione delle superfici di facciata coinvolge non soltanto istanze estetiche e artistiche, riferite alle leggi matematiche e geometriche di proporzionalità fra tasselli, bensì anche istanze tecniche, legate alla concezione costruttiva degli elementi di involucro prefabbricati, da assemblare in opera a secco per la realizzazione di un rivestimento ultimo.

Una progettazione consapevole dell'involucro architettonico, inteso come superficie unitaria avvolgente, è volta alla realizzazione di un elemento che sia capace di abbinare a un grande valore estetico e comunicativo, proprietà tecniche tali da garantire un comportamento energetico efficiente, in termini di benessere interno e contenimento dei consumi.

Nella progettazione di edifici contemporanei, l'involucro acquisisce sempre maggiore rilevanza, rappresentando il punto di convergenza e di applicazione di tutti i molteplici aspetti progettuali: forma e decorazione, materiali e tecnologia, costruzione e struttura, energia e impianti, manutenzione e costi.

Alla luce degli obiettivi e dei paradigmi di ricerca, considerate le differenti applicazioni costruttive del materiale innovativo AAM proposto per l'efficientamento energetico dell'involucro, sono state inizialmente elaborate alcune ipotesi progettuali per l'impiego del materiale geopolimerico nella realizzazione di un sistema di involucro continuo.

Come si vede in tutte le soluzioni progettuali illustrate successivamente, a partire dallo studio delle forme presenti in natura, le indagini morfologiche condotte hanno portato a disegnare una maglia strutturale costituita da celle di forma esagonale.



[Fig. 11] Principio del *closest packing*: possibili dislocazione di circonferenze disposte secondo il principio dell'impacchettamento compatto (in alto) ; tassellazione di una superficie, comparando il principio del *closest packing* generato da identiche circonferenze e quello generato da identici esagoni regolari (in basso): tra i due, soltanto gli esagoni, e dunque anche i triangoli, consentono una tassellazione completa dello spazio bidimensionale.

In questa geometria si avverte un grande potenziale per la modulazione delle superfici di involucro: essa, infatti, consente di ottenere un *tiling* di superficie corrispondente all'ottimizzazione geometrica dello spazio, e al contempo alla massimizzazione della stabilità geometrica della configurazione strutturale. Inoltre, una maglia esagonale consente di ottenere superfici dotate del più elevato grado di deformabilità e curvatura, al fine di progettare un nuovo involucro adattabile alla geometria dell'edificio esistente.

Le forme in natura sono sempre generate in funzione della loro struttura, in stretta dipendenza con le funzioni da compiere, presentando un caratteristico spettro di differenziazione all'interno dei limiti posti dai determinati processi formativi⁶. La caratterizzazione di tali processi formativi nelle strutture naturali è governata dai principi di minimo impiego di energia: la più semplice espressione di questo fenomeno risiede nel principio dell'impacchettamento compatto, o impacchettamento più densamente possibile (*closest packing*)⁷.

L'impacchettamento compatto consiste nella costruzione di una disposizione regolare infinita (reticolo) di sfere identiche, in modo da riempire la maggiore porzione possibile di uno spazio tridimensionale infinito. Si tratta dunque di una configurazione strutturale di stabilità geometrica che trova espressione nello spazio tridimensionale generato dai sistemi biologici, così come nella densa disposizione degli atomi sferici nel reticolo molecolare di alcuni metalli. Se si uniscono i centri di tali identiche sfere impacchettate più densamente possibile, si ottiene una disposizione tridimensionale di triangoli equilateri. Risulta evidente l'analogia tra il principio dell'impacchettamento compatto e quello della triangolazione, di cui sono note le proprietà geometriche di rigidità e stabilità strutturale.

Il triangolo, infatti, è l'unico poligono stabile, dunque rigido, in virtù delle sue proprietà geometriche. Questo fenomeno può essere facilmente dimostrato dalla realizzazione di una cornice triangolare i cui vertici siano connessi da cerniere: a differenza degli altri poligoni costituiti da più di tre lati, i quali possono collassare facilmente se connessi con altri simili, una cornice triangolare rimane rigida, indipendentemente dal materiale di costruzione. Di conseguenza, tra i cinque solidi platonici⁸, le uniche forme stabili in virtù della propria geometria sono quelle costituite dall'aggregazione di triangoli, ossia il tetraedro, l'ottaedro e l'icosaedro.

Nello spazio euclideo bidimensionale, F. Gauss dimostrò che la disposizione regolare di cerchi con la maggiore densità risulta essere l'impacchettamento esagonale, in cui i centri dei cerchi sono disposti secondo un reticolo esagonale, lungo file scaglionate (come in un alveare) e ogni

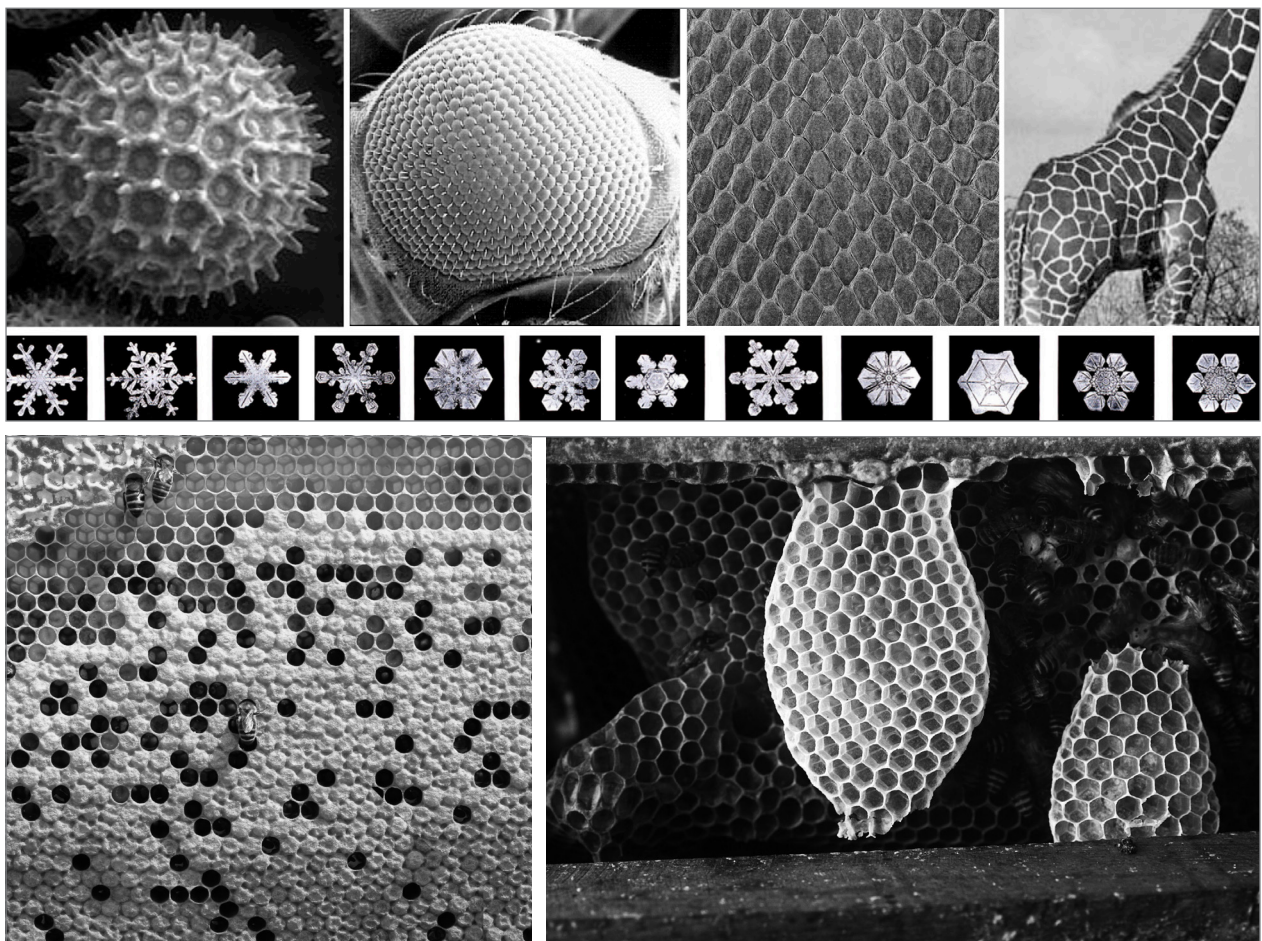
6 Forty A., *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*, Thames & Hudson, Londra 2004.

7 Pearce P., *Structure in nature is a strategy for Design*, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1990.

8 Platone fu la prima persona a tentare una descrizione geometrica delle strutture in natura. Inoltre, egli esplorò la possibilità di sviluppare un repertorio di forme geometriche di base (in questo caso si parla di triangoli retti) in grado di essere aggregati e di generare i cinque poliedri regolari: i cinque "solidi platonici" (tetraedro, ottaedro, esaedro, icosaedro, dodecaedro) rappresentano gli unici poliedri convessi costituiti da facce poligonali regolari identiche, in cui i vertici sono equivalenti.

cerchio è circondato da altri sei cerchi. Se i centri dei cerchi o degli esagoni costituenti il pattern vengono uniti tra loro, si ottengono delle file di triangoli. Tale dislocazione esagonale, e dunque triangolare, corrisponde alla configurazione ottenibile mediante l'impiego della minima quantità di energia. In ogni caso, qualora si analizzi l'intero sistema di forze che conducono a una configurazione stabile di un sistema fisico, si ritrova la soluzione triangolare, associata all'impiego del minimo quantitativo di energia, o comunque al minimo utilizzo di risorse.

Tra tutte le figure geometriche piane, il cerchio racchiude la maggior area di superficie per una data circonferenza o, in alternativa, racchiude una data area con il minor perimetro. Analogamente, tra tutte le figure tridimensionali, la sfera racchiude il maggior volume con la minor area di superficie. In ambito di partizione dello spazio, però, il cerchio e la sfera non rappresentano più le possibilità formali maggiormente economiche, in termini di tassellazione dello spazio e ottimizzazione della distribuzione degli elementi che lo occupano.



[Fig. 12] Esempi del principio del *closest packing* presenti in natura: (in alto, da sinistra) struttura dei grani di polline, tessuto oculare delle mosche, tessuto epiteliale dei rettili, manto delle giraffa; (in basso) struttura dei fiocchi di neve.

[Fig. 13] Alveare realizzato dalle api: uno degli esempi più suggestivi di *closest packing* esagonale.

Considerando una partizione dello spazio regolata dal principio dell'impacchettamento compatto, nonostante ogni cerchio sia molto economico singolarmente, in termini di distribuzione dello spazio si osserva la formazione di piccoli triangoli concavi tra un cerchio e i sei che lo circondano.

Se si pensa a una graduale modellazione dei pattern da circolari a esagonali, si assiste al raggiungimento progressivo della più ottimale configurazione di partizione di una superficie, in porzioni di uguale area [Fig. 11].

La ripetizione di un pattern esagonale rappresenta una configurazione spaziale ampiamente diffusa all'interno del mondo fisico, regolata dal principio di impacchettamento compatto, riscontrabile in molteplici forme naturali: le celle alveolari costruite dalle api, il manto della giraffa, il tessuto epiteliale dei rettili, il tessuto oculare delle mosche, i grani di polline, le cellule di giunco, i fiocchi di neve, l'aggregazione degli atomi nei cristalli [Fig. 12].

Questa semplice logica geometrica ha condotto all'esplorazione della maglia esagonale per la modulazione di una superficie piana, caratterizzata dall'assenza di spazi vuoti interstiziali tra le celle, tramite l'utilizzo della più semplice forma. L'impacchettamento esagonale rispecchia la relazione fondamentale tra il principio della triangolazione dei centri dei cerchi costituenti l'impacchettamento circolare e il principio di minima quantità di struttura impiegata per la partizione della massima area. Qualora gli esagoni siano esattamente regolari, la rete triangolare individuata sarà composta interamente da triangoli regolari che si incrociano in gruppi da sei in corrispondenza di ogni vertice.

In conclusione, si potrebbe così formulare una *Legge di Impacchettamento compatto e Triangolazione*: quando qualsiasi forza attrattiva interna o esterna contribuisce alla formazione di matrici di unità volumetriche (bolle di sapone, cellule, atomi), è riscontrabile il maggior numero possibile di unità adiacenti, i cui centri si trovano alla minore distanza possibile. La rete che unisce i centri delle celle adiacenti tra loro risulta sempre essere a maglia triangolare, tendendo a dimensioni sempre più regolari e uniformi.

Inoltre, quando queste unità volumetriche sono costituite da interfacce fluide, esse tendono ad assumere la forma di celle poliedriche aventi la minor area di superficie relativa ai loro volumi, costituite da facce inclinate di 120° rispetto agli spigoli e di spigoli inclinati di $109^\circ 28'$ rispetto ai vertici. Questi angoli di inclinazione derivano direttamente dalle forze di tensione superficiale e soddisfano le condizioni di impiego del minimo potenziale di energia.⁹

Il più comune esempio di impacchettamento compatto, e certamente l'espressione più affascinante e sublime, è la struttura dell'alveare delle api. Questo sistema, costituito da una maglia esagonale, permette di immagazzinare la maggiore quantità di miele con il minimo utilizzo di materiale di cera, attraverso l'utilizzo di una struttura per la costruzione della quale è richiesto il minimo impiego di energia da parte delle api [Fig. 13].

⁹ Pearce P., *Structure in nature is a strategy for Design*, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1990.

Le riflessioni sulle logiche geometriche espresse all'interno di questa parte introduttiva hanno condotto all'investigazione di due particolari soluzioni di involucro, fondate sui medesimi paradigmi di ricerca, concepite per costituire una seconda pelle di rivestimento di edifici recenti già esistenti, al fine di migliorarne le caratteristiche prestazionali.

Alla luce delle istanze di ricerca e delle prerogative sulla validità delle soluzioni tecniche preventivate per l'incremento delle prestazioni energetiche del patrimonio edilizio scolastico recente, realizzato con le moderne tecniche di prefabbricazione in conglomerato cementizio armato, è possibile avanzare alcune prime ipotesi su un sistema costruttivo di involucro edilizio idoneo e compatibile per questo tipo di patrimonio edilizio.

Considerando le proprietà fisiche e i requisiti prestazionali del materiale innovativo proposto per lo svolgimento di interventi di addizione volumetrica in facciata, e tenendo conto delle esigenze di sostenibilità degli interventi in termini di flessibilità progettuale e variabilità geometrica, prefabbricazione e posa in opera a secco, si possiede un valido punto di partenza per la formulazione di soluzioni progettuali efficienti.

III.1 I SISTEMA DI INVOLUCRO COSTITUITO DA CUBI AUTOBLOCCANTI *TIM - TOPOLOGICALLY INTER-LOCKED MATERIALS*

(LABORATOIRE GSA – ENSAPM ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE PARIS-MALAKAIS)

Il I Sistema innovativo di involucro costituito da cubi autobloccanti *TIM - Topologically Interlocked Materials* è studiato presso il *Laboratoire GSA - Géométrie Structure Architecture* de l'ENSAPM - École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malakais, dedicato allo sviluppo di tematiche di ricerca scientifica secondo un approccio geometrico e strutturale supportato da software di analisi meccanica, seguito da una validazione del modello attraverso la realizzazione di prototipi, verifica ultima essenziale per la validità del progetto.

Il sistema costruttivo a secco è basato sull'assemblaggio di conci identici di forma cubica, a costituire una struttura bidimensionale in cui essi siano topologicamente autobloccati, dunque mantenuti stabili nella loro posizione, grazie agli sforzi reciprocamente scambiati in virtù delle loro proprietà geometriche. Questo sistema di assemblaggio presenta grandi potenziali per lo sviluppo di soluzioni costruttive innovative dotate di un'elevata resistenza meccanica, aprendo nuove possibili strade nel campo del design di strutture e materiali.

L'aspetto innovativo non consiste soltanto nell'applicazione del principio di autobloccaggio, tipicamente utilizzato per i componenti edilizi bidimensionali orizzontali (quali solai, pavimentazioni, coperture) a componenti verticali di facciata, bensì anche nell'impiego di un nuovo materiale geopolimerico ecosostenibile.

Le tecniche costruttive tradizionali per la posa in opera di elementi prefabbricati a secco prevedono la realizzazione di pezzi preconfigurati, secondo una forma che presenti un sistema di assemblaggio e incastro tra le singole celle, mediante l'ausilio di dispositivi di connessione e ancoraggio meccanico. Alla luce delle problematiche riscontrate durante l'analisi dello stato dell'arte delle soluzioni tecnologiche esistenti nel settore edilizio, si vuole perseguire una maggiore continuità del sistema di involucro ed omogeneità del materiale utilizzato, a fronte di una maggiore semplificazione del processo di fabbricazione.

Per adempiere a questi requisiti, il progetto di ricerca propone un differente approccio al processo di produzione di strutture assemblate, basato sulle proprietà topologiche e morfologiche di determinati solidi geometrici autobloccanti, a costituire semplici elementi convessi, senza ricorrere all'utilizzo di elementi aggiuntivi di connessione che, agendo come dissipatori di tensioni, comporterebbero limiti significativi alla struttura.

In particolare, il sistema costruttivo proposto per la realizzazione di superfici di involucro per il recupero degli edifici esistenti è basato sul principio dell'assemblaggio di elementi autobloccanti identici tra loro, a costituire un sistema in cui lo spostamento di ogni elemento è impedito dalla presenza di uno identico, immediatamente adiacente. L'esistenza di questa categoria di elementi

autobloccanti apre nuovi orizzonti per la generazione di morfologie suggestive, concepite come l'assemblaggio di elementi a costituire un sistema innovativo dotato di un'elevata resistenza meccanica.

Le ricerche già sviluppate in questo ambito dimostrano che elementi identici che presentano la forma dei cinque solidi platonici¹⁰ possono essere assemblati tra loro al fine di costituire una struttura bidirezionale (orizzontamenti o partizioni verticali) nella quale essi siano topologicamente autobloccati, semplicemente grazie agli sforzi reciprocamente scambiati in virtù delle loro proprietà geometriche.

In linea con le riflessioni geometriche svolte in campo di tassellazione dello spazio euclideo bidimensionale, si può comprendere e analizzare il passaggio allo spazio tridimensionale, studiando le proprietà geometriche di sistemi costituiti dall'assemblaggio di solidi platonici, in relazione alla tassellazione del piano costituito dalle loro sezioni mediane.

10 La denominazione di questi solidi deriva dal fatto che Platone fu la prima persona a tentare una descrizione geometrica delle strutture in natura. Inoltre, egli esplorò la possibilità di sviluppare un repertorio di forme geometriche di base (triangoli retti) in grado di essere aggregati e di generare i cinque poliedri regolari. I cinque solidi Platonici (tetraedro, ottaedro, esaedro, icosaedro, dodecaedro) rappresentano gli unici poliedri convessi costituiti da facce poligonali regolari identiche, in cui i vertici sono equivalenti.

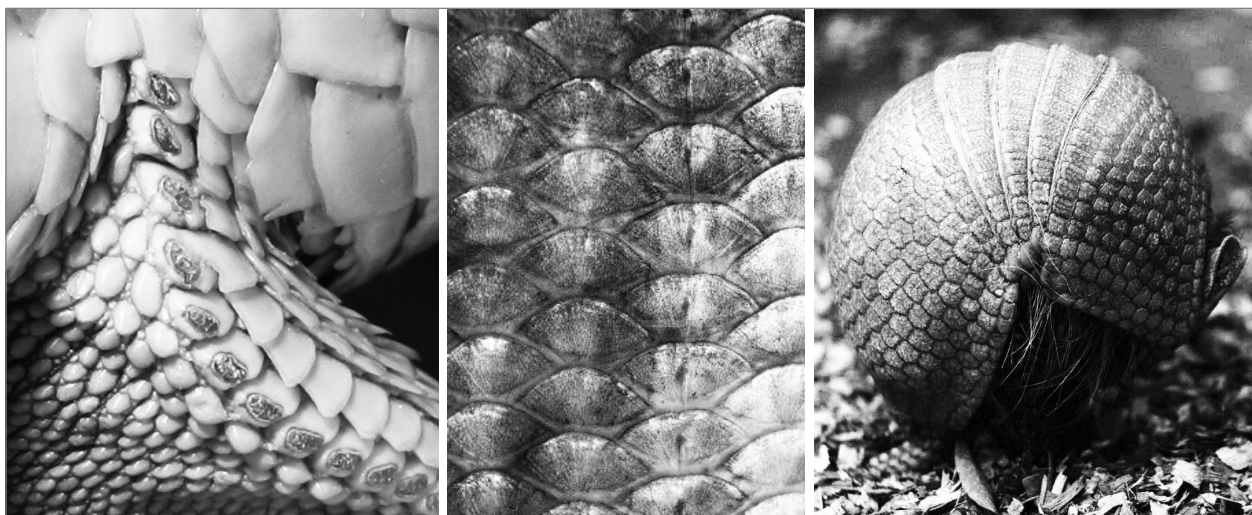
III.1.1 PROGETTAZIONE PARAMETRICA DEL SISTEMA COSTRUTTIVO

SISTEMI AUTOBLOCCANTI: *TIM - TOPOLOGICALLY INTERLOCKED MATERIALS*

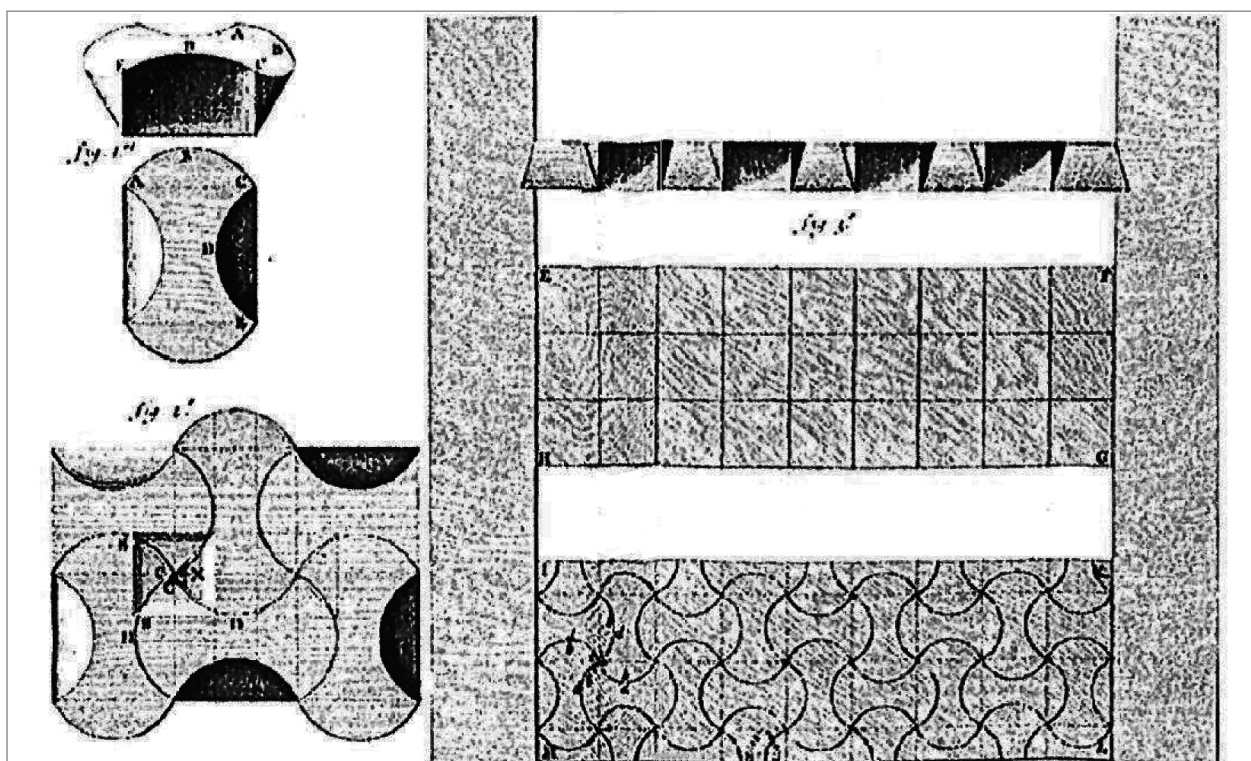
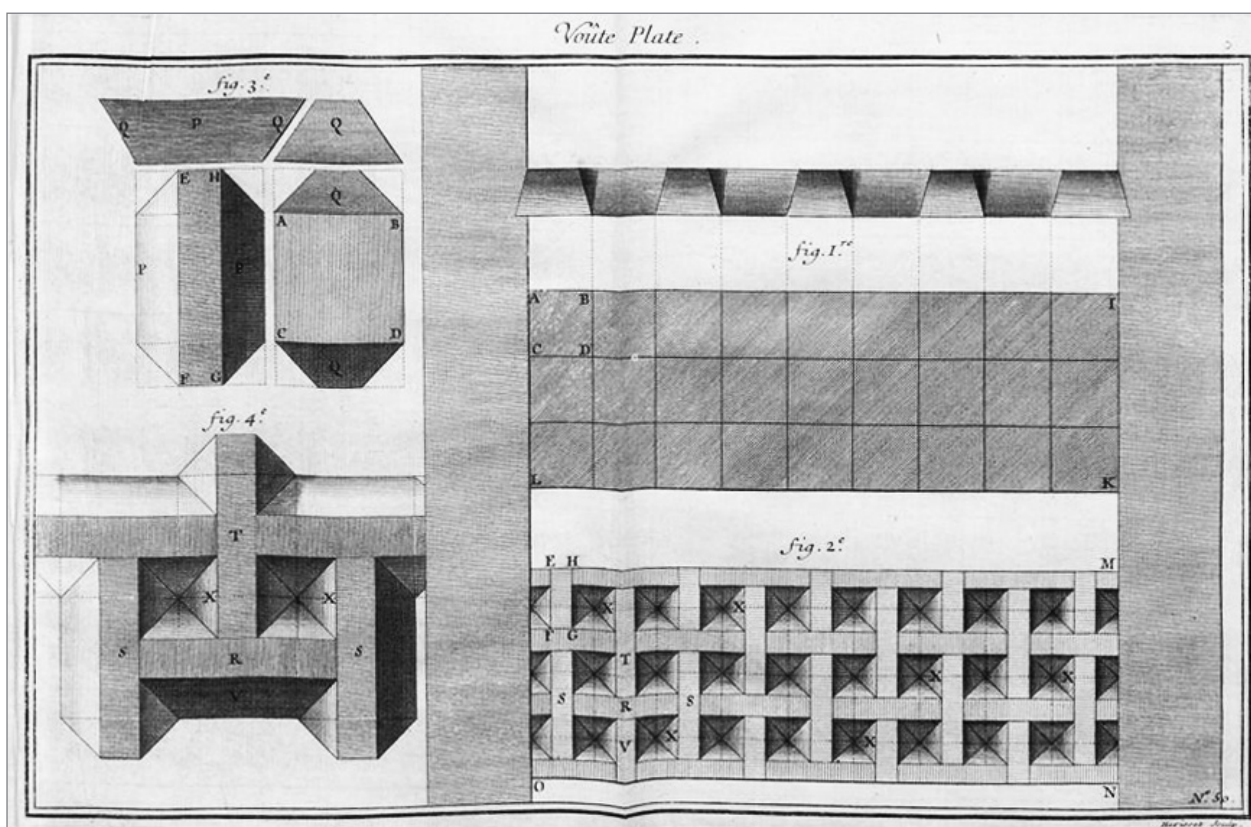
I sistemi autobloccanti sono generati a partire dall'assemblaggio di elementi secondo una configurazione tale per cui essi costituiscono un sistema compatto e unitario, senza l'ausilio di elementi aggiuntivi di connessione. Tra questi sistemi, i *TIM - Topologically Interlocked Materials* rappresentano una particolare classe, caratterizzata dalla capacità di realizzare una struttura sfruttando esclusivamente le proprietà topologiche intrinseche dei solidi assemblati.

Il principio costruttivo alla base della concezione di un sistema autobloccante consiste nella segmentazione e nel successivo assemblaggio di elementi modulari. A partire da un dato componente di base, è possibile creare innumerevoli configurazioni, tramite il suo accostamento ad altri elementi simili o identici e la combinazione di diverse modalità di assemblaggio, per realizzare strutture con diverso grado di ottimizzazione.

Ancora una volta, è possibile formulare una analogia tra le forme organiche presenti in natura e la morfologia degli elementi costruttivi in architettura. Infatti, le strutture osservabili in natura non sono mai monolitiche, ma si ispirano a principi di segmentazione e assemblaggio: basta pensare alla spina dorsale degli animali vertebrati, al carapace di tartarughe e armadilli, o ancora alla pelle squamata di pesci e rettili. La frammentazione in componenti di varie forme e morfologie serve agli esseri viventi per conferire loro un alto grado di deformabilità, adattamento e multifunzionalità [Fig. 14].



[Fig. 14] Esempi di strutture frammentarie presenti in natura per consentire la flessibilità di movimenti agli esseri viventi: (da sinistra) tessuto squamato dei rettili; pelle squamata dei pesci costituita da scaglie; carapace flessibile dell'armadillo per assumere posizioni di autodifesa.



[Fig. 15] *Volta piana (Voûte plate)* di Joseph Abeille (1735): tavola illustrativa del concio poliedrico di base e del sistema di assemblaggio per la realizzazione di una volta piana, ideato nel 1699.

[Fig. 16] *Solaio (Plancher)* di Jean Truchet (1699): estradosso piano e continuo, dunque calpestabile.

La storia delle costruzioni insegna che, nel corso dei secoli, anche le strutture architettoniche sono state progettate facendo sempre maggior riferimento a questo modello compositivo, basato sul principio di frammentazione e segmentazione. Un potente strumento per realizzare strutture ispirate a questi principi è fornito dal sistema di assemblaggio autobloccante, nel quale gli elementi costituenti non sono legati tra loro da alcun collante o connettore, ma sono semplicemente accostati secondo un meccanismo di autobloccaggio determinato dalle loro proprietà geometriche.

Innumerevoli esempi si trovano ripercorrendo la storia delle costruzioni fin dalle origini, a partire dalle murature a secco in pietra o in muratura, fino alla realizzazione di piattabande¹¹, archi, volte e cupole, realizzati a partire dall'assemblaggio di elementi unitari. Per questa tipologia di strutture, il trasferimento dei carichi tra i componenti avviene tramite le superfici di contatto e le forze di compressione scambiate reciprocamente tra loro, la cui azione è combinata alle forze-peso di ogni singolo concio.

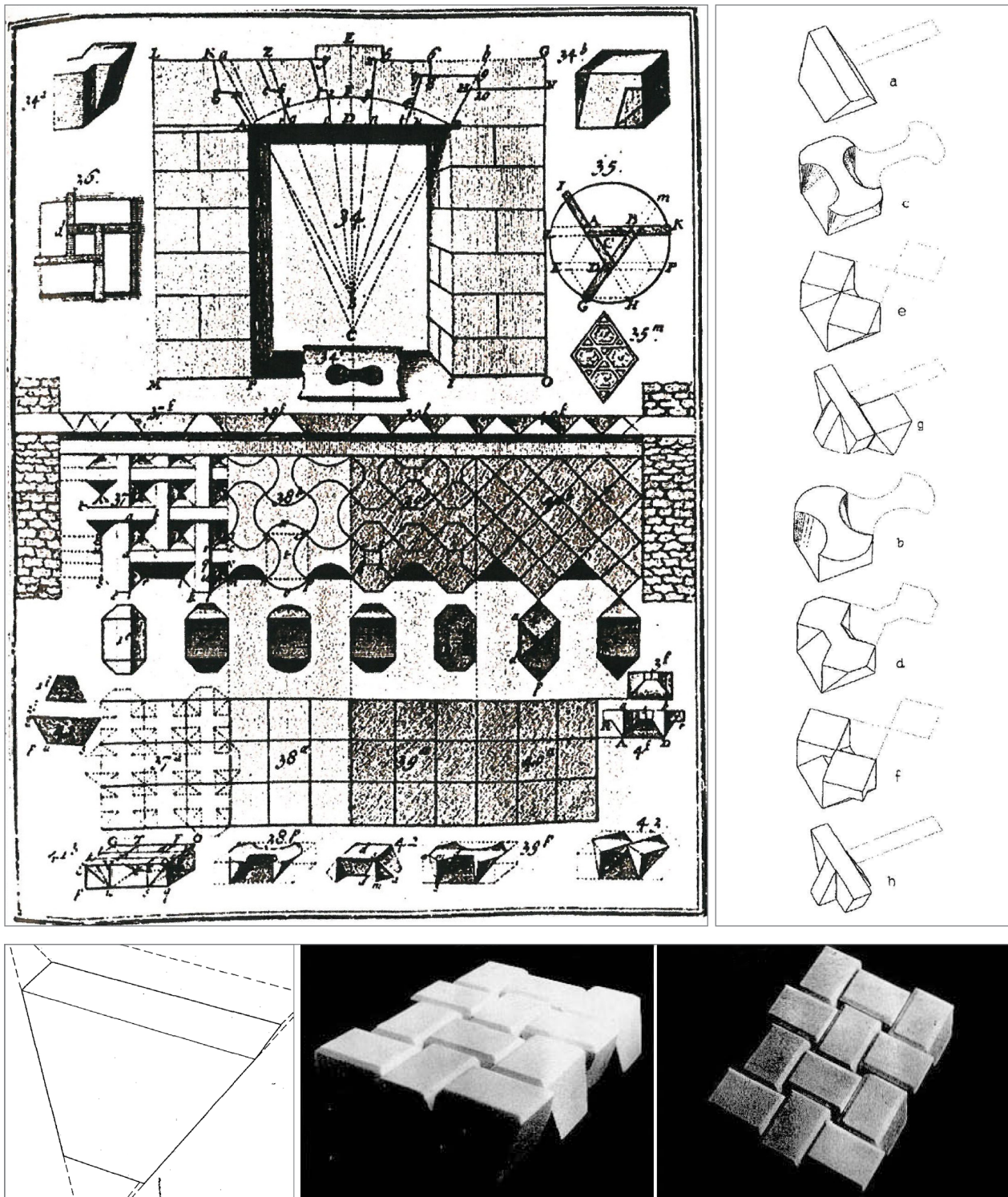
Prima di citare qualche esempio importante di struttura bidirezionale autobloccante, per comprendere i principi costruttivi di queste particolari strutture assemblate, occorre fornire la definizione di *volta piana*, rivolta a tutte le strutture stereotomiche esposte di seguito. “Il sistema stereotomico noto col termine di *voûte plate*, rappresenta una delle più interessanti speculazioni tecnico-stilistiche dell'arte del taglio delle pietre applicate alla costruzione edilizia, che ha trovato nella storia rarissime realizzazioni. (...) Il problema storico posto consiste nel trovare una soluzione costruttiva per coprire un vano con un solaio piano costituito da piccoli elementi discreti: in altri termini, costruire una volta in conci lapidei di freccia pari a zero o raggio infinito. (...) Il principio statico che è alla base di questo sistema coprente presuppone che il percorso dei carichi sovrastanti la struttura si direzioni dalla verticale all'orizzontale, attraverso l'opportuna ammorsatura dei singoli conci, che garantisce la totale compressione del sistema coprente (volta piana)”¹².

In ambito di strutture autobloccanti, risulta di particolare interesse la *Volta piana di Abeille*¹³, ideata e brevettata nel 1699 dall'ingegnere francese J. Abeille [Fig. 15]. In questo tipo di assemblaggio, la tassellazione della superficie è ottenuta tramite la traslazione e la rotazione di un unico concio-tipo: un poliedro che presenta le due sezioni assiali, a forma di trapezio isoscele, orientate in direzioni opposte. In questa struttura, i conci vengono disposti secondo direzioni alternate, in modo tale che ogni elemento poliedrico venga supportato da altri due, senza ricorrere a connessioni di carpenteria tra i moduli, tradizionalmente impiegate nelle costruzioni in pietra. A montaggio avvenuto, questo tipo di volta presenta due diverse tassellazioni visibili di superficie: una ma-

11 Mazzoli C., *Sapere tecnico e spiegazione scientifica nelle pratiche di intervento sul costruito storico. Analisi e progetto del modello della piattabanda di Saint-Sulpice*, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Relatore: Prof. Gulli R., Correlatori: Ing. Brocato M., Ing. Porrino M., DAPT Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale – Università degli Studi di Bologna, A.A. 2010-2011.

12 Fallacara G. (2007)

13 Brocato M., Mondardini L., *A new type of stone dome based on Abeille's bond*, in “International Journal of Solids and Structures”, n. 49, Elsevier, 2012, pp. 1786-1801.



[Fig. 17] *Tavola illustrativa* di Amédée François Frézier (1735): costruzione di piattabande e solai in legno e in pietra, mediante l'assemblaggio di elementi identicamente ripetuti, a formare un sistema autobloccante.

[Fig. 18] Moduli geometrici da assemblare per la realizzazione di volte piane: modulo di Abeille (a), modulo di Truchet (b), e varianti di Truchet (c-h).

[Fig. 19] *G-block System* di Michael Glickman (1984): elemento base ottenuto dal troncamento di un tetraedro regolare, e sistema di assemblaggio per la realizzazione di un elemento bidirezionale piano.

glia quadrata omogenea e continua all'estradosso, e una trama che richiama l'interessante motivo dell'intreccio tessile con fori piramidali all'intradosso.

Tale struttura è in grado di sopportare grandi carichi trasversali ma, a causa della sua configurazione geometrica, può essere caricata soltanto in una direzione. Il funzionamento statico di questa soluzione è quello di una piastra piana bidirezionale che lavora identicamente nelle due direzioni: in essa ogni concio sostiene ed è sostenuto, in modo che la volta entri in funzione esclusivamente a montaggio completo.

A partire dal brevetto di solaio di Abeille, caratterizzato da un estradosso non calpestabile decorato con interessanti motivi geometrici, altri matematici, ingegneri e architetti elaborano alcune declinazioni del sistema, ideando nuove forme per i conci da assemblare. In particolare, il primo teorico, matematico e accademico, a studiare una variante del sistema è J. Truchet che, nel 1699, seppur con solidi geometrici complessi, risolve il problema dei vuoti tipici dell'estradosso della volta piana di Abeille, al fine di rendere il solaio praticabile¹⁴ [Fig. 16, 17].

Un'altra personalità importante per la storia della costruzione che si occupa di questa tematica è A. F. Frézier, che nel suo *Traité de Stéréotomie* (1737-39) denota l'ispirazione della volta piana di Abeille ai solai di S. Serlio (1545) e J. Wallis (1695). Dopo una attenta analisi critica [Fig. 18] del sistema proposto da Abeille (a) e da Truchet (b), egli propone una serie di varianti geometriche per i conci, al fine di colmare i vuoti caratteristici della volta piana e di riempire completamente lo spazio interposto tra l'estradosso piano e l'intradosso. La prima proposta (c) utilizza superfici coniche, mentre le seguenti sono delimitate soltanto da piani (d, h). Una variante (f) della (e) risponde al problema di evitare l'acutezza del vertice, mentre la variante (g) combina due pezzi distinti.

Un altro esempio di struttura autobloccante è fornito dalla struttura *G-Block System* suggerita da M. Glickman¹⁵ nel 1984, costituita da blocchi di forma poliedrica regolare troncata, a formare un sistema di blocchi che si scambiano sforzi reciproci attraverso le superfici complementari di contatto [Fig. 19].

Tutte le strutture riportate a titolo di esempio di sistemi autobloccanti richiedono la presenza di appoggi in corrispondenza del perimetro, al fine di fornire un elemento di confinamento della struttura monostrato, oltre che un elemento fondamentale per la trasmissione dei carichi della volta piana agli elementi di supporto sottostante.

Con il termine *TIM – Topological Interlocked Materials*, introdotto nel 2003, si vuole ampliare e generalizzare il concetto sopra esposto, indicando una nuova classe di materiali creati a partire da un singolo elemento unitario, che interagisce con gli altri simili grazie alle forze di contatto, combinate all'azione di una cornice periferica di contenimento.

¹⁴ Gargiani R. (sotto la direzione di), *L'architrave, le plancher, la plate-forme. Nouvelle histoire de la construction*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Losanna 2012.

¹⁵ Glickman M., *The G-Block System of vertically interlocking paving*, in "2nd International Conference on Concrete Block Paving Proceedings", Delft (Paesi Bassi), 10-12 April 1984, pp. 345-348.

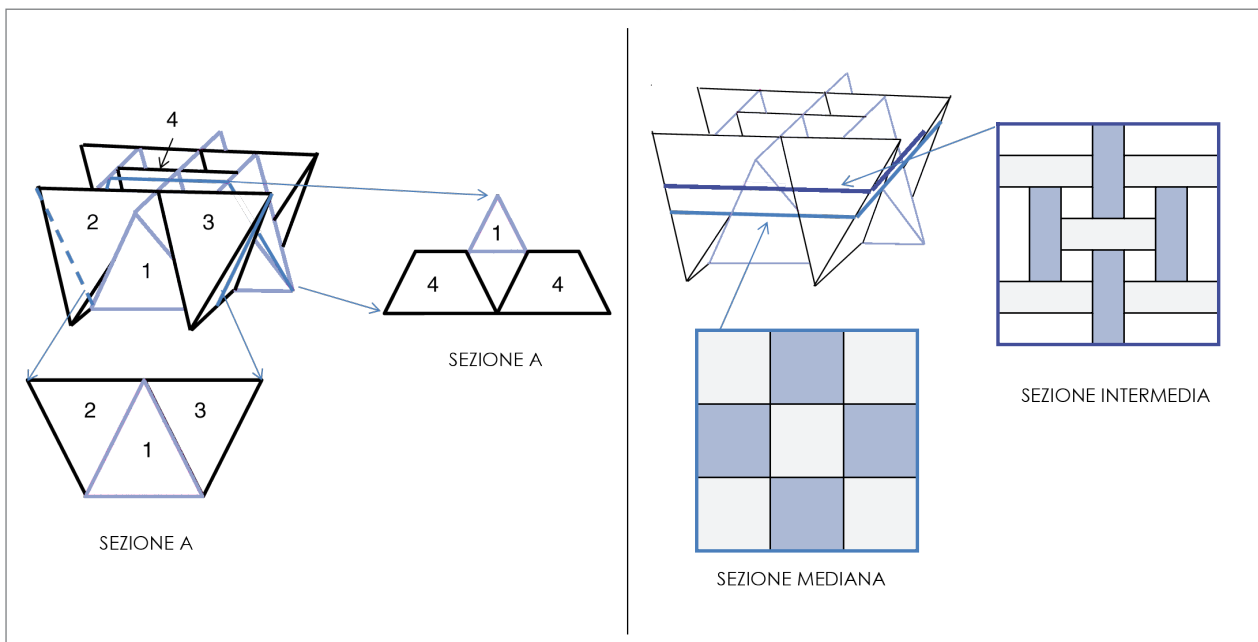
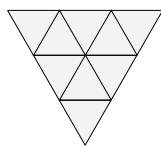
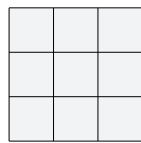


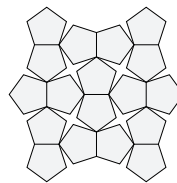
FIGURE GEOMETRICHE AMMISSIBILI PER LA TASSELLAZIONE REGOLARE DI UNO SPAZIO EUCLIDEO



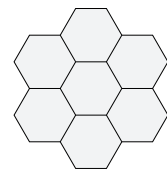
$360^\circ/3$



$360^\circ/4$



~~$360^\circ/5$~~



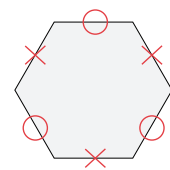
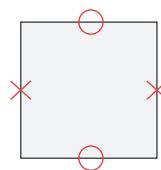
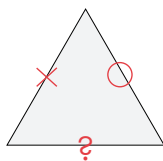
$360^\circ/6$

TRA QUESTE 3 FIGURE AMMISSIBILI, SOLTANTO 2 CONSENTONO DI OTTENERE UN SISTEMA AUTOBLOCCANTE

Condizione: ogni unità deve presentare almeno 2 coppie di facce di blocchi adiacenti

✗ PORTANTE

○ PORTATO



[Fig. 20] (In alto) Sistema autobloccante TIM costituito da tetraedri regolari: viste assonometriche e sezioni. Sezioni verticali significative (a sinistra): nella sezione A, il movimento di risalita del blocco 1 è impedito dai blocchi 2 e 3, mentre nella sezione B il movimento di discesa verso il basso è impedito dal blocco 4. Sezioni orizzontali significative (a destra): il movimento degli elementi è impedito dalla sezione mediana che, tassellando interamente il piano, non lascia lo spazio necessario per consentire lo spostamento verticale dei blocchi.

[Fig. 21] Schema illustrativo delle regole geometriche che limitano la realizzazione di un sistema autobloccante TIM mediante l'assemblaggio di solidi platonici che forniscano una sezione mediana di forma quadrata oppure esagonale regolare.

È dimostrato che i TIM possiedono caratteristiche meccaniche peculiari¹⁶, quali:

- alto margine di tolleranza al collasso;
- rigidezza negativa se sottoposti a determinate condizioni di carico (soltanto per solidi cubici);
- resistenza variabile in funzione del controllo degli elementi di contenimento periferico;
- risposta quasi-duttile alle sollecitazioni;
- reversibilità e capacità di essere riutilizzati per un nuovo assemblaggio;
- variabilità di resistenza e rigidezza in funzione della densità relativa dei singoli elementi.

La letteratura in ambito di sistemi autobloccanti TIM riporta numerose ricerche condotte che dimostrano la possibilità di realizzare questo sistema di assemblaggio tramite la composizione di qualsiasi solido platonico. Esiste dunque una grande varietà di forme che permettono la costituzione di un sistema topologicamente autobloccante, realizzabile assemblando uno fra i cinque solidi platonici, dal quale derivano ampie possibilità formali per la generazione di disegni geometrici e morfologici, dalle proprietà di resistenza meccanica interessanti.

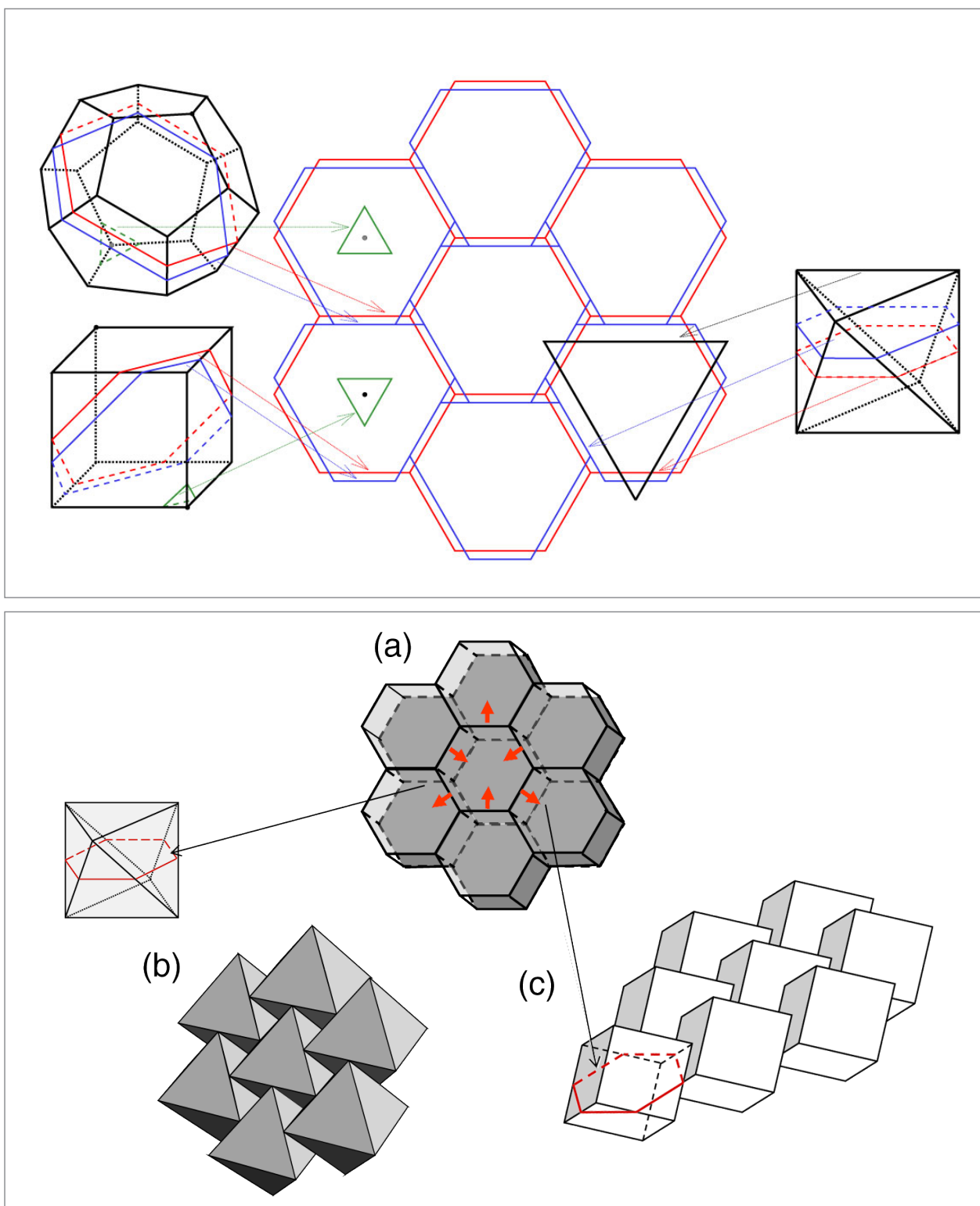
Ad esempio, questa particolare configurazione autobloccante è resa possibile utilizzando dei tetraedri regolari, assemblati tra loro come mostrato in figura [Fig. 20]: secondo questo sistema, nessuno dei blocchi costituenti il pannello può essere rimosso dal piano, ad esclusione di quelli collocati perifericamente. Pertanto, bloccando questi conci collocati esternamente, la struttura mantiene la sua integrità.

Per comprendere a fondo il principio di assemblaggio di questi elementi tetraedrici autobloccanti identici tra loro, impiegati nella realizzazione di strutture bidimensionali, si consideri l'evoluzione geometrica della sezione secondo un piano parallelo al piano contenente la struttura, che trasli lungo l'asse ad esso ortogonale. Soltanto la sezione mediana, ossia quella ottenuta in corrispondenza del punto medio dello spessore della struttura bidirezionale, risulta di forma quadrata: muovendosi verticalmente verso l'estremità superiore, essa assume una forma rettangolare che degenera infine in un segmento, in corrispondenza dello spigolo; analogamente, muovendosi lungo l'asse verticale verso l'estremità inferiore, la sezione assume una forma rettangolare sempre più allungata, fino a degenerare in un segmento identico al precedente, ma ruotato di 90°.

Inoltre, considerando la sezione mediana della struttura, si nota come ogni elemento abbia bisogno della presenza di almeno due coppie di facce di blocchi adiacenti affinché sia impedito ogni movimento lungo la direzione ortogonale al piano. Ciò significa che non è possibile ottenere un sistema autobloccante basato sulla tassellazione planare di triangoli regolari [Fig. 21]. Le sole tassellazioni regolari ammissibili sono dunque fornite da una maglia quadrata o esagonale regolare (*honeycomb pattern*).

Mentre la tassellazione regolare dello spazio euclideo secondo una maglia quadrata regolare

¹⁶ Estrin Y., Dyskin A. V., Pasternak E., *Topological interlocking as a material design concept*, in "Materials Science and Engineering C", n. 31, Elsevier, 2010, pp. 1189-1194.



[Fig. 22] Pattern esagonale ottenibile dall'assemblaggio di tre solidi platonici: dodecaedro, cubo e ottaedro. Per ognuno di questi solidi: in rosso è rappresentata la sezione mediana esagonale regolare, in blu le sezioni intermedie di forma esagonale deformata, in verde le sezioni triangolari (solo per dodecaedro e cubo).

[Fig. 23] Sistema di autobloccaggio tra gli elementi adiacenti all'interno di un sistema TIM (a) costituito dall'assemblaggio di ottaedri (b) e cubi (c) secondo le regole predefinite.

è ottenibile mediante l'assemblaggio di tetraedri, per avere una tassellazione periodica caratterizzata da un pattern esagonale regolare, è possibile scegliere fra tre solidi platonici differenti: il cubo, l'ottaedro e il dodecaedro [Fig. 22]. All'interno di questo sistema, l'elemento di riferimento risulta sempre topologicamente autobloccato grazie alle sue proprietà geometriche intrinseche e al mutuo incastro con gli altri elementi adiacenti, identici ad esso [Fig. 23].

In generale, per questo tipo di sistemi autobloccanti, si può affermare che un elemento risulta bloccato se e solo se, traslando il piano di sezione lungo la direzione ortogonale al piano contenente l'insieme di elementi, in entrambi i versi, il poligono corrispondente degenera in un segmento o in un punto.

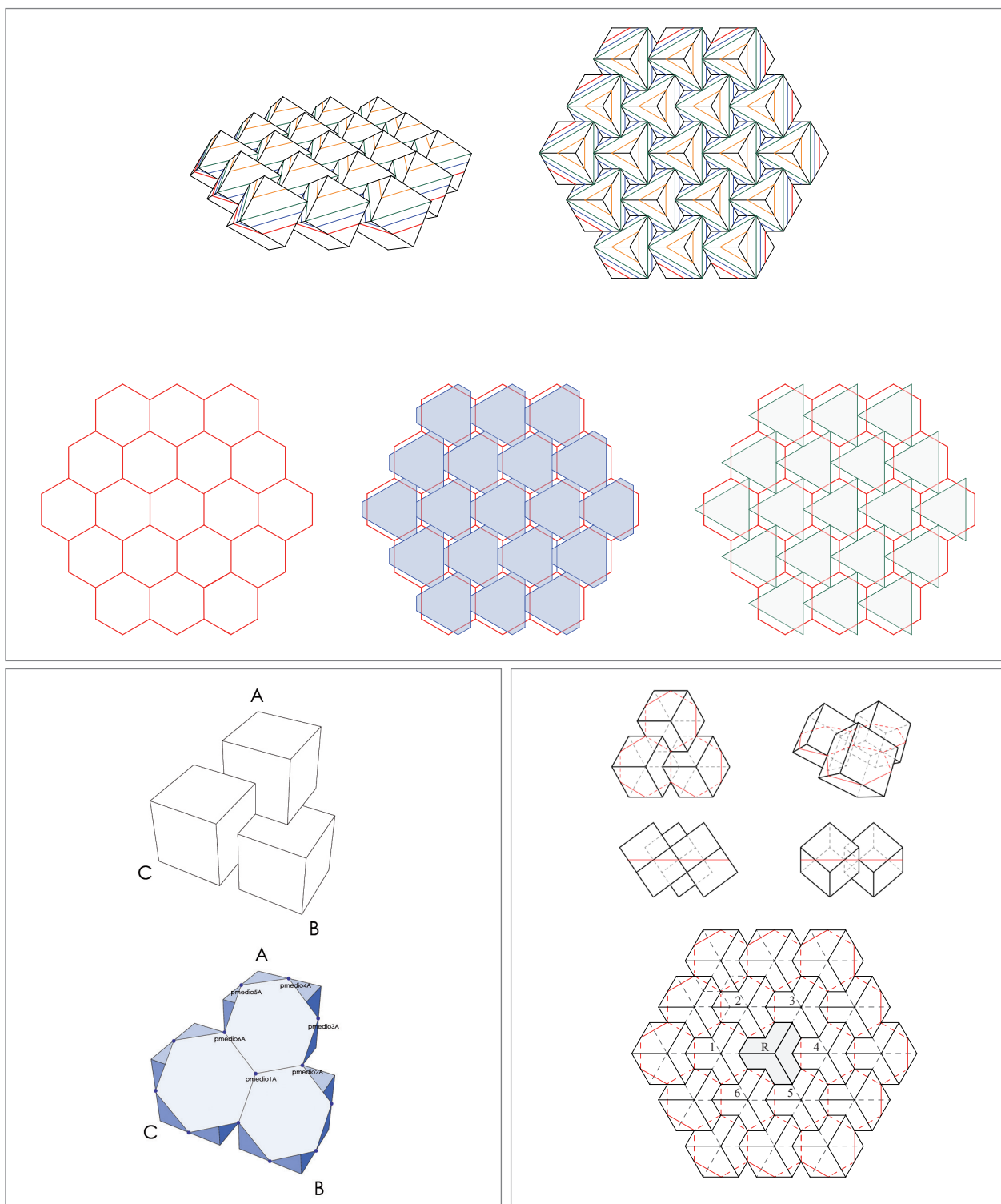
Questo concetto è meglio comprensibile guardando l'immagine a lato [Fig. 22]: la tassellazione esagonale in corrispondenza della sezione mediana (in rosso) si trasforma in un esagono deformato (in blu) quando il piano di sezione viene traslato e allontanato da quello mediano. Per un ottaedro la sezione esagonale degenera in un triangolo regolare (in nero) coincidente con la faccia superiore; per un cubo la sezione esagonale degenera in un triangolo (in verde) che si riduce progressivamente avvicinandosi al vertice, fino a degenerare in un punto (in nero); per un dodecaedro la sezione esagonale degenera in un triangolo (in verde), fino a confluire in un punto, coincidente con il vertice del solido (in grigio).

In linea con le riflessioni geometriche svolte all'interno della parte introduttiva del presente capitolo, fra i tre solidi platonici componibili per ottenere un pattern esagonale, il progetto di ricerca approfondisce le possibilità offerte dall'assemblaggio di uno in particolare, identicamente ripetuto: l'esaedro, o più semplicemente il cubo.

Il sistema di assemblaggio proposto per la composizione di un sistema di facciata autoportante è costituito da un insieme di conci di forma cubica, assemblati in modo tale che ogni singolo blocco sia mantenuto nella sua posizione dai blocchi circostanti. Il sistema bidirezionale così configurato si presenta resistente, flessibile e duttile, in grado di sopportare carichi significativi, in presenza di un elemento di confinamento e chiusura dell'insieme. Tale sistema presenta elevati potenziali per lo sviluppo di processi per la progettazione di soluzioni innovative per sistemi bidirezionali su varie scale, in funzione della differente applicazione in ambito edilizio (muri o solai).

In linea con l'approccio impiegato precedentemente per esplicitare il sistema autobloccante tramite sezioni progressive, anche l'assemblaggio di cubi TIM può essere meglio compreso mediante lo studio dell'andamento delle sezioni a partire da un vertice estremo, fino ad arrivare all'altro suo opposto [Fig. 24].

Per comprendere a fondo l'origine del processo morfogenetico e costruttivo del sistema proposto, occorre partire dall'analisi dell'elemento di base. Si prenda un cubo e lo si sezioni secondo un piano inclinato, passante per il suo centro e per i punti medi dei suoi spigoli, come si vede in figura [Fig. 25]: si ottiene così una sezione esagonale regolare.



[Fig. 24] Analisi dell'evoluzione progressiva della sezione del sistema autobloccante TIM, costituito da cubi, lungo la direzione perpendicolare al piano bidirezionale contenente la volta piana.

[Fig. 25] Sezione mediana dei cubi assemblati secondo un piano inclinato per ottenere una sezione esagonale regolare.

[Fig. 26] Sistema autobloccante TIM costituito da cubi: (dall'alto) viste del sistema modulare di base, costituito da tre cubi assemblati secondo la configurazione necessaria per ottenere delle sezioni esagonali regolari in continuità tra loro, disposte lungo il piano orizzontale; schema illustrativo del sistema di autobloccaggio del blocco di riferimento R.

Per realizzare una struttura autobloccante a partire dall'assemblaggio di cubi identici tra loro, occorre procedere alla loro disposizione secondo una configurazione tale per cui la loro sezione esagonale regolare sia in continuità sullo stesso piano, configurando un pattern esagonale (*honeycomb pattern*), in grado di tassellare interamente il piano di sezione dei cubi.

Come si vede in figura [Fig. 26], i cubi 1, 3, 5 circostanti il cubo di riferimento R gli impediscono di compiere movimenti di traslazione lungo la direzione perpendicolare al piano del foglio, nel senso entrante, mentre i cubi 2, 4, 6 gli impediscono un movimento analogo, ma nel senso uscente dal foglio. Allo stesso tempo, anche qualsiasi rotazione del cubo R risulta vincolata, dimostrando così che il cubo risulta autobloccato, grazie alle sue proprietà topologiche intrinseche.

Gli elementi topologicamente autobloccanti TIM, grazie alla loro particolare geometria, vengono assemblati tra loro secondo una precisa configurazione: mentre gli elementi sono mantenuti nella loro collocazione grazie ai vincoli cinematici imposti intrinsecamente dalla loro forma e dagli sforzi mutui scambiati tra loro, l'intera struttura è tenuta insieme da un elemento perimetrale di contenimento.

La grande potenzialità di questa tipologia di assemblaggi consiste nella possibilità di realizzare strutture costituite da blocchi che realmente non presentano alcun elemento di connessione puntuale. Pertanto, le fessurazioni che normalmente si vengono a creare in seguito all'azione di sollecitazioni esterne non possono propagarsi da un blocco a un altro, bensì vengono arrestate in corrispondenza dei contorni dei conci. Inoltre, è dimostrato che tale tipo di struttura è in grado di conservare la sua integrità fino a quando viene rispettato il limite massimo di numero di elementi mancanti¹⁷. Un materiale concepito secondo queste finalità presenta un'elevata resistenza meccanica, oltre che un grande margine di tolleranza di deformabilità prima di giungere al collasso.

Ciò che distingue i TIM dai tradizionali elementi autobloccanti usati in costruzione è proprio l'assenza di chiavi o connettori, che richiederebbero una accurata fase di prefabbricazione degli elementi (taglio con macchine CNC o stampa 3D da modelli CAD-CAM), e che agirebbero come concentratori di tensioni, riducendo la resistenza globale della struttura. In definitiva, i TIM consentono di combinare la flessibilità e la tolleranza alle fratture locali, grazie alla suddivisione della loro struttura in componenti, agendo a favore dell'integrità della totalità della struttura.

La natura frammentaria dei TIM offre molteplici vantaggi, fra cui, in primo luogo, la possibilità di combinare elementi costituiti da materiali differenti, offrendo proprietà interessanti per i nuovi orizzonti progettuali nell'ambito di tecniche a secco per il recupero dell'involucro edilizio.

In secondo luogo, la scomposizione consente di avere dei vantaggi in termini di resistenza e stabilità strutturale. Normalmente la resistenza diminuisce all'aumentare della dimensione dell'elemento costituito da un materiale fragile, a causa dell'alta probabilità che esso possa dare origine

¹⁷ A. V. Dyskin, Y. Estrin, A. J. Kanel-Belov, E. Pasternak, *Topological interlocking of platonic solids: a way to new materials and structures*, in "Philosophical Magazine Letters", Vol. 83, No. 3, Taylor & Francis, 2002 pp. 197-203.

al collasso. Il principio di autobloccaggio consente di realizzare una struttura ottenuta dall'assemblaggio di blocchi di piccole dimensioni, contribuendo così al miglioramento della resistenza.

Inoltre, trattandosi di un sistema assemblato, le fessurazioni normalmente originate a livello locale in un blocco vengono arrestate in corrispondenza delle facce dei conci adiacenti, impedendo la propagazione delle lesioni. L'incremento della stabilità strutturale deriva dalla capacità di particolari strutture autobloccanti di resistere, nonostante la mancanza accidentale o progettuale, di una certa percentuale di elementi (stimabile intorno al 25% circa).

Il sistema così concepito consente di assemblare elementi geometricamente identici tra loro costituiti da materiali differenti, per realizzare un unico layer, o ancora di accostare differenti layer, geometricamente identici (dunque perfettamente incastrati tra loro) costituiti ognuno da materiale differente.

Questo sistema, ampiamente studiato in letteratura come sistema bidirezionale per orizzontamenti, presenta un elevato potenziale per lo sviluppo di soluzioni costruttive innovative, aprendo nuove possibili strade nel campo del design di strutture e materiali, esteso anche alla progettazione di strutture bidimensionali verticali.

Tali proprietà, infatti, risultano di grande rilevanza per la definizione di sistemi costruttivi di facciata, oggetto del progetto di ricerca: il sistema studiato, infatti, consente di comporre un pacchetto costruttivo di facciata costituito dalla sovrapposizione di più strati, al fine di raggiungere le prestazioni termiche e meccaniche richieste per la riqualificazione dell'edificio oggetto di intervento¹⁸.

18 Si pensi ad esempio alla sovrapposizione di uno strato di cubi autobloccanti TIM costituito da materiale pesante e massivo, resistente agli agenti atmosferici, che conferisca l'inerzia termica e la resistenza meccanica del sistema di facciata autoportante, seguito da uno strato geometricamente identico, costituito da materiale più leggero e isolante termicamente, perfettamente incastrato e posto internamente, che migliori le prestazioni termiche dell'involucro. La composizione di questi due layer, collocata in adiacenza alla facciata esistente di un edificio, e opportunamente studiata nei punti di connessione meccanica, consentirebbe di realizzare un involucro continuo, efficiente, coerente con le istanze di progetto.

CONCEZIONE GEOMETRICA CON SOFTWARE PARAMETRICO-VARIAZIONALE *WOLFRAM MATHEMATICA*

Nonostante la semplicità geometrica dell'elemento di base impiegato per realizzare la struttura bidirezionale autobloccante, il sistema di facciata proposto dal progetto di ricerca presenta un notevole grado di complessità a livello globale.

La semplice regola di assemblaggio tra gli elementi cubici identici può essere tradotta nella realizzazione di modelli virtuali mediante l'utilizzo di software parametrici, in grado di gestire la geometria complessa grazie al controllo di alcuni fattori.

Come si vedrà in seguito, il software impiegato per l'analisi meccanica del sistema strutturale (*Cast3M 2000*) richiede di realizzare un modello, in questo caso tridimensionale, dotato di un elevato grado di pulizia del fattore geometrico, definito da valori molto accurati e precisi delle coordinate dei punti coinvolti. Un punto fondamentale della modellazione svolta mediante *Cast3M* riguarda proprio la fase iniziale di importazione dei dati che definiscono la geometria all'interno del software, presentati secondo un formato idoneo e compatibile con esso, per il loro successivo trattamento.

Il software parametrico-variazionale *Wolfram Mathematica* rappresenta uno strumento valido per la produzione di questo tipo di informazioni, rendendo possibile la realizzazione di geometrie complesse, la loro visualizzazione e l'esportazione dei dati numerici necessari per la ricostruzione del sistema geometrico, mediante un preciso controllo delle cifre significative dei dati.

Mathematica rappresenta un ambiente di calcolo simbolico e numerico multiplatforma, ideato nel 1986 da S. Wolfram, e successivamente sviluppato da un team di matematici e programmatori. Grazie a *Wolfram Mathematica* è possibile realizzare la geometria dei diversi moduli cubici impiegati per la composizione del pannello di facciata, al fine di procedere successivamente all'esportazione delle coordinate dei punti con un grado di approssimazione controllato, da importare infine all'interno del software *Cast3M* per lo svolgimento dell'analisi meccanica.

La definizione della geometria globale parte dalla creazione del componente di base di facciata, ossia il modulo composto dai tre cubi (A, B, C) [Fig. 25]. Riproducendo questo modulo, identicamente ripetuto, lungo entrambe le direzioni di un piano, si ottiene la struttura geometrica globale autobloccante, inevitabilmente di forma romboidale.

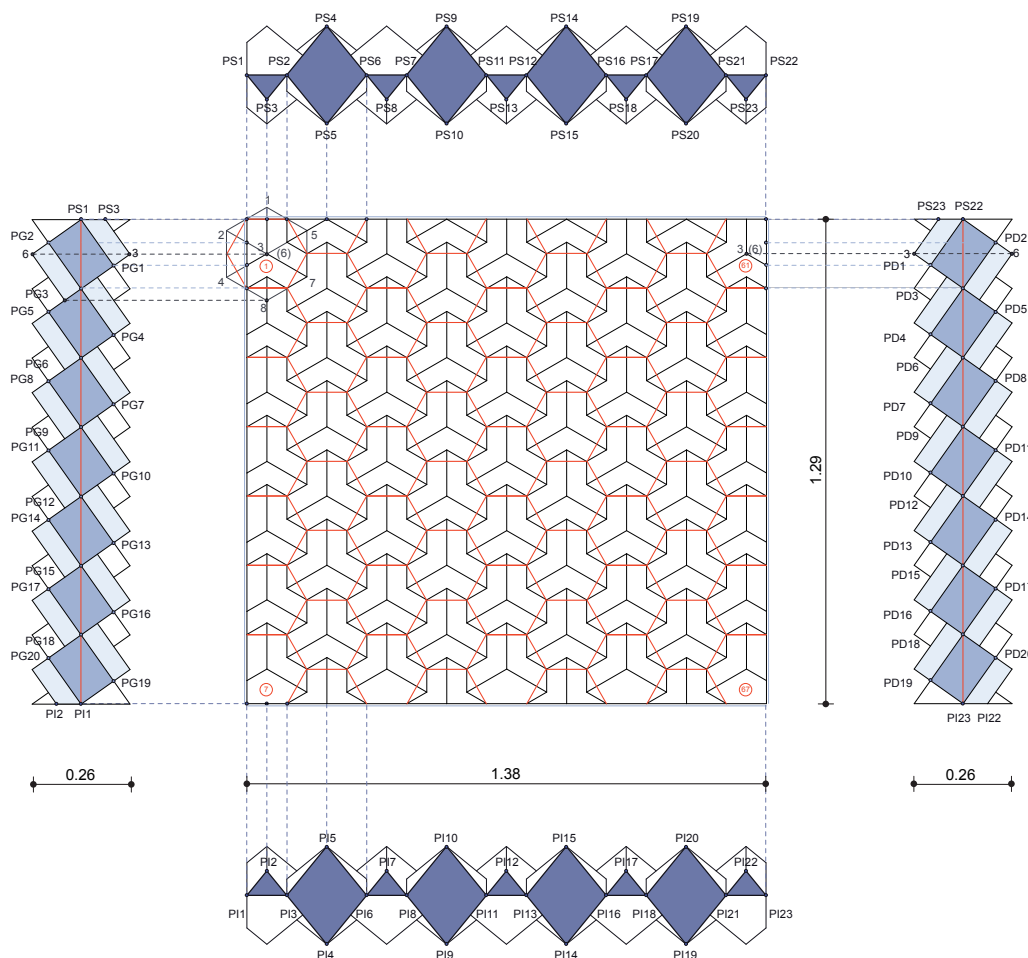
Mediante successive operazioni di rotazione tridimensionale, isolando i moduli giacenti nell'area interessata dallo sviluppo della porzione di facciata oggetto di studio, si ottiene un pannello quadrato costituito da un totale di n. 67 cubi [Fig. 27-29].

Grazie alla parametricità del modello creato in *Mathematica*, la dimensione del cubo di base può essere modificata variando semplicemente un parametro iniziale, consentendo così una rapida rigenerazione del modello e una veloce successiva esportazione delle coordinate per la creazione del modello geometrico da analizzare meccanicamente.

Modellazione del sistema autobloccante

Pannello quadrato con cubi perimetrali sezionati _ MURO MONOSTRATO ARMATO

Numerazione dei punti periferici (vista fronte)



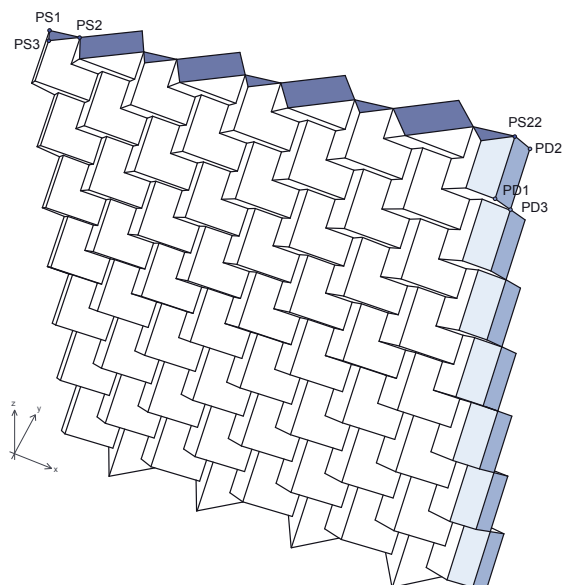
Piani di sezione per ottenere un pannello dai bordi piani:
orizzontali: POS, POI
verticali: PVD, PVG

[Fig. 27] Schema rappresentante la numerazione e la denominazione dei vertici dei conci cubici, adottate durante lo script di *Mathematica*, al fine di sezionare i cubi perimetrali ed esportare le coordinate finali in *Cast3M*.

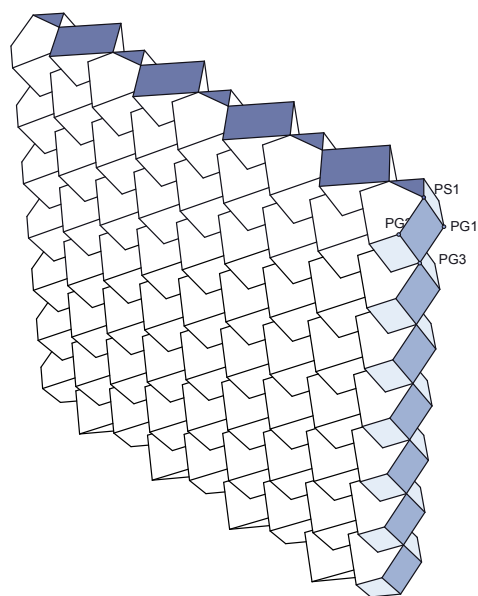
Modellazione del sistema autobloccante

Pannello quadrato con cubi perimetrali sezionati _ MURO MONOSTRATO ARMATO

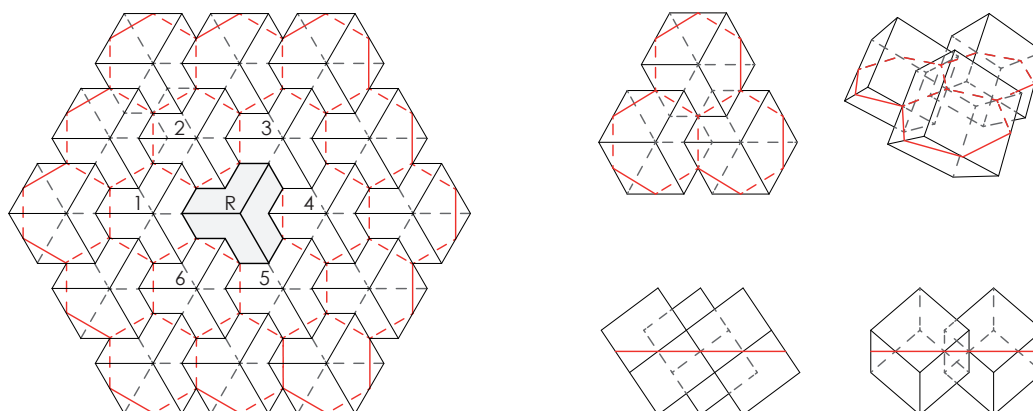
Prospettiva (vista fronte)



Prospettiva (vista retro)



Principio di autobloccaggio



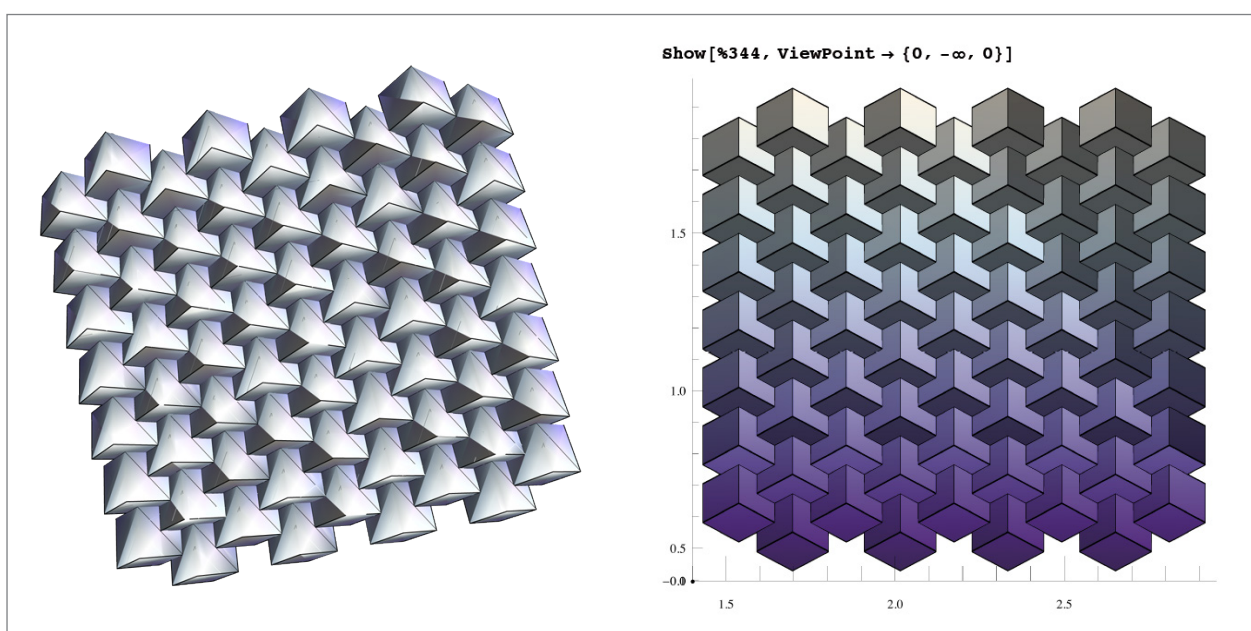
[Fig. 28] Vista prospettica dello schema di numerazione e denominazione dei vertici dei concii cubici perimetrali tagliati secondo piani orizzontali e verticali (sopra); schema di assemblaggio del sistema autobloccante (sotto).

Una volta realizzato il modello geometrico in *Mathematica*, il processo di scripting si conclude con l'esportazione delle coordinate dei vertici delle unità, impostando una approssimazione adeguata alle esigenze e alle caratteristiche supportate da *Cast3M*, sotto forma di file di testo leggibile dal programma di analisi meccanica.

La fase di concezione morfologica e strutturale del sistema autobloccante di facciata e la sua progettazione parametrica, supportata dall'impiego di un software parametrico-variazionale, rappresentano la fase iniziale del processo integrato di analisi e progetto del sistema di involucro.

In linea con le istanze e i paradigmi di ricerca, la speditività e la facilità di gestione dei dati parametrici relativi alla struttura progettata, a fronte del tempo impiegato per svolgere una accurata e minuziosa ingegnerizzazione del sistema, rappresentano un fattore fondamentale nell'ottica della sostenibilità degli interventi.

Al fine di ottenere un pannello perfettamente rettangolare, inscrivibile all'interno di una cornice rettangolare dai bordi piani, dotata di un bordo inferiore piano e regolare per l'appoggio a terra della struttura, si procede alla sezione dei cubi perimetrali del pannello, secondo piani verticali ed orizzontali. Le ultime righe del codice di *Mathematica* sono dedicate a questa operazione di troncamento, finalizzata all'estrazione delle coordinate dei vertici dei cubi perimetrali sezionati e alla successiva esportazione per l'implementazione in *Cast3M*, secondo l'ordine e la numerazione stabiliti e rappresentati nelle tavole finaliz [Fig. 27, 28].



[Fig. 29] Viste del modello geometrico realizzato con il software parametrico-variazionale *Wolfram Mathematica*: le coordinate dei vertici dei n. 67 cubi di lato L , vengono direttamente esportate da uno script che consente di importare successivamente il modello tridimensionale nel software *Cast3M* per lo svolgimento delle analisi meccaniche col Metodo degli Elementi Finiti.

III.1.2 ANALISI MECCANICA E TERMICA

Le molteplici possibilità formali offerte da tale soluzione costruttiva possono essere esplorate dal punto di vista geometrico e analitico, utilizzando gli strumenti di modellazione per l'analisi meccanica e termica. Risulta, infatti, fondamentale studiare il comportamento meccanico del sistema di montaggio e di connessione dell'involucro, attraverso la messa a punto di un modello matematico.

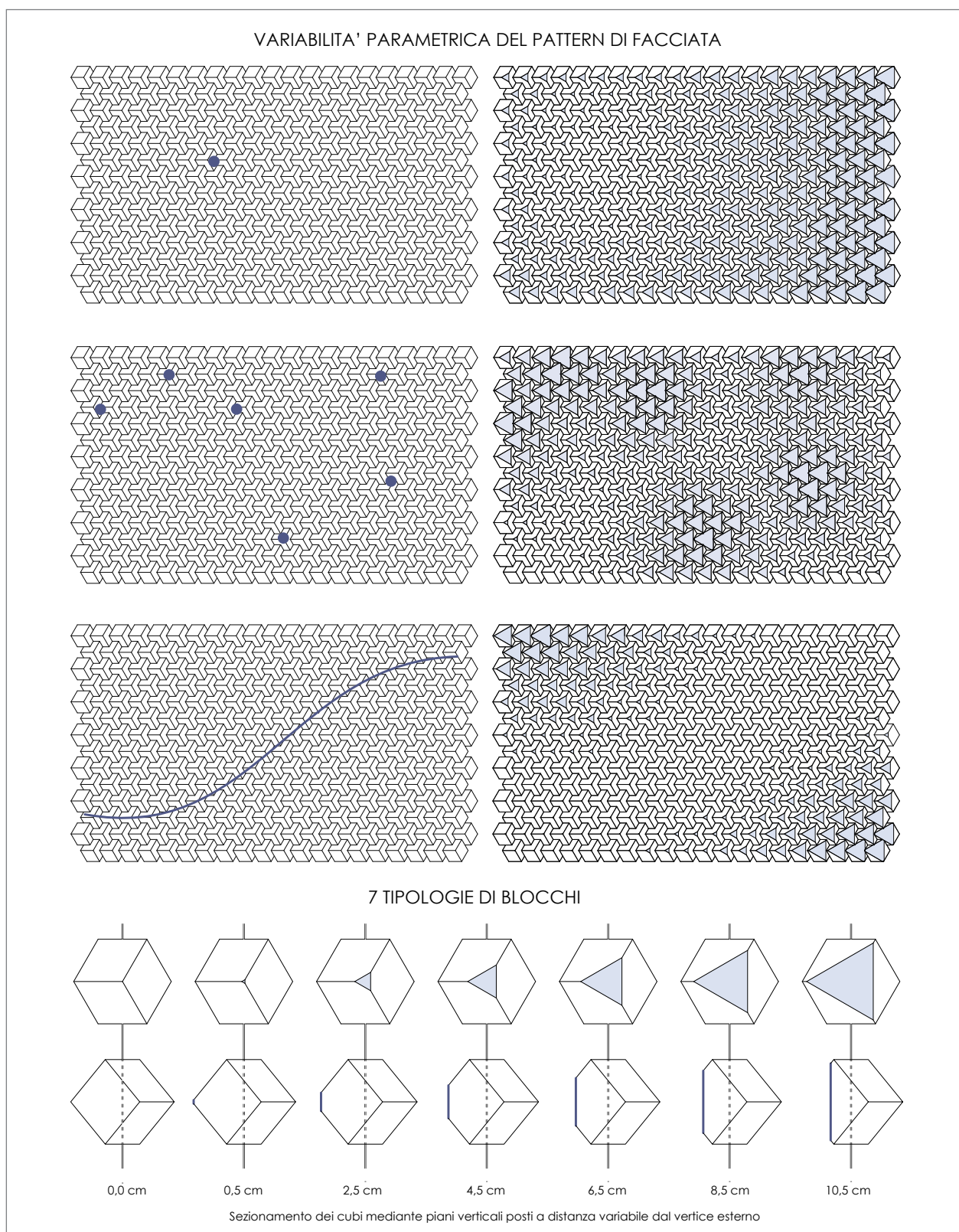
Il modello del sistema costruttivo di involucro è stato elaborato a partire dalla creazione del modello geometrico realizzato con il software parametrico-variazionale *Wolfram Mathematica* [Fig. 29], importato successivamente all'interno del software *Cast3M 2000* per lo svolgimento delle analisi meccaniche e termiche del sistema, tramite il Metodo degli Elementi Finiti (FEM).

Lo studio della variabilità di questi elementi costituenti la modularità del sistema di facciata è volto alla concezione di una facciata "attiva", dal comportamento dinamico, adattabile alla geometria dell'edificio esistente. Il dinamismo della composizione dell'involucro consiste nella capacità di variare lo spessore di questa seconda pelle, in funzione delle esigenze di isolamento termico e di ventilazione naturale, sfruttando i vuoti interstiziali creati naturalmente dalla morfologia del sistema, secondo la distribuzione spaziale interna e secondo le differenti caratteristiche climatiche del contesto.

Mediante questo sistema di facciata, si prevede di riuscire a rispondere con esiti soddisfacenti al requisito richiesto di dinamicità, grazie alla possibilità di variare la geometria dei solidi assemblati. In particolare, sezionando il pannello di facciata secondo piani verticali collocati a diverse profondità rispetto al muro perimetrale esistente, il sistema di cubi TIM consente di ottenere una trama del disegno di facciata a celle esagonali e triangolari irregolari che, oltre ad avere un effetto chiaroscurale suggestivo, consente di variare localmente lo spessore e, dunque, la resistenza termica del pacchetto murario [Fig. 30].

Considerando l'applicazione del principio di autobloccaggio a un sistema bidirezionale verticale (muro o pannello di facciata), infatti, sezionando la parete secondo piani verticali collocati a diverse profondità rispetto al muro perimetrale esistente, tale sistema costruttivo basato sull'assemblaggio di cubi TIM consente di ottenere un disegno di facciata caratterizzato da una interessante modularità delle ombreggiature, nel rispetto delle primarie istanze morfologiche di caratterizzazione degli edifici prefabbricati oggetto di intervento.

Sezionando ogni cubo fino a una diversa profondità, è così possibile ottenere una particolare modulazione di superficie, ottemperando al contempo alle istanze di "dinamicità" prestazionale dell'involucro, in funzione delle esigenze di isolamento termico. In un'ottica di progettazione parametrico-variazionale del sistema di involucro, l'unico requisito fondamentale da considerare durante la progettazione della variabilità di questo tipo di facciata riguarda la necessità di non ol-



[Fig. 30] Esplorazione delle possibilità formali ottenibili dal sezionamento dei cubi costituenti i pannelli di facciata, secondo piani verticali posti a una distanza dal vertice esterno variabile in funzione degli algoritmi definiti dall'utente, mediante l'uso di software di progettazione parametrica.

trepassare la sezione mediana verticale di ogni cubo, ossia quella che garantisce la tassellazione completa dello spazio secondo esagoni regolari, assicurando il funzionamento meccanico della struttura autobloccante.

In linea generale, dal punto di vista strutturale, qualsiasi sistema di involucro deve essere progettato per resistere a compressione e flessione, e dunque anche a presso-flessione, considerando i conseguenti problemi di stabilità. Inoltre, il sistema deve essere progettato per sopportare e compensare la deformazione della struttura principale dell'edificio esistente, provocata in seguito all'azione dei pesi propri e dei carichi accidentali, così come all'azione dei carichi dinamici orizzontali del vento e del sisma.

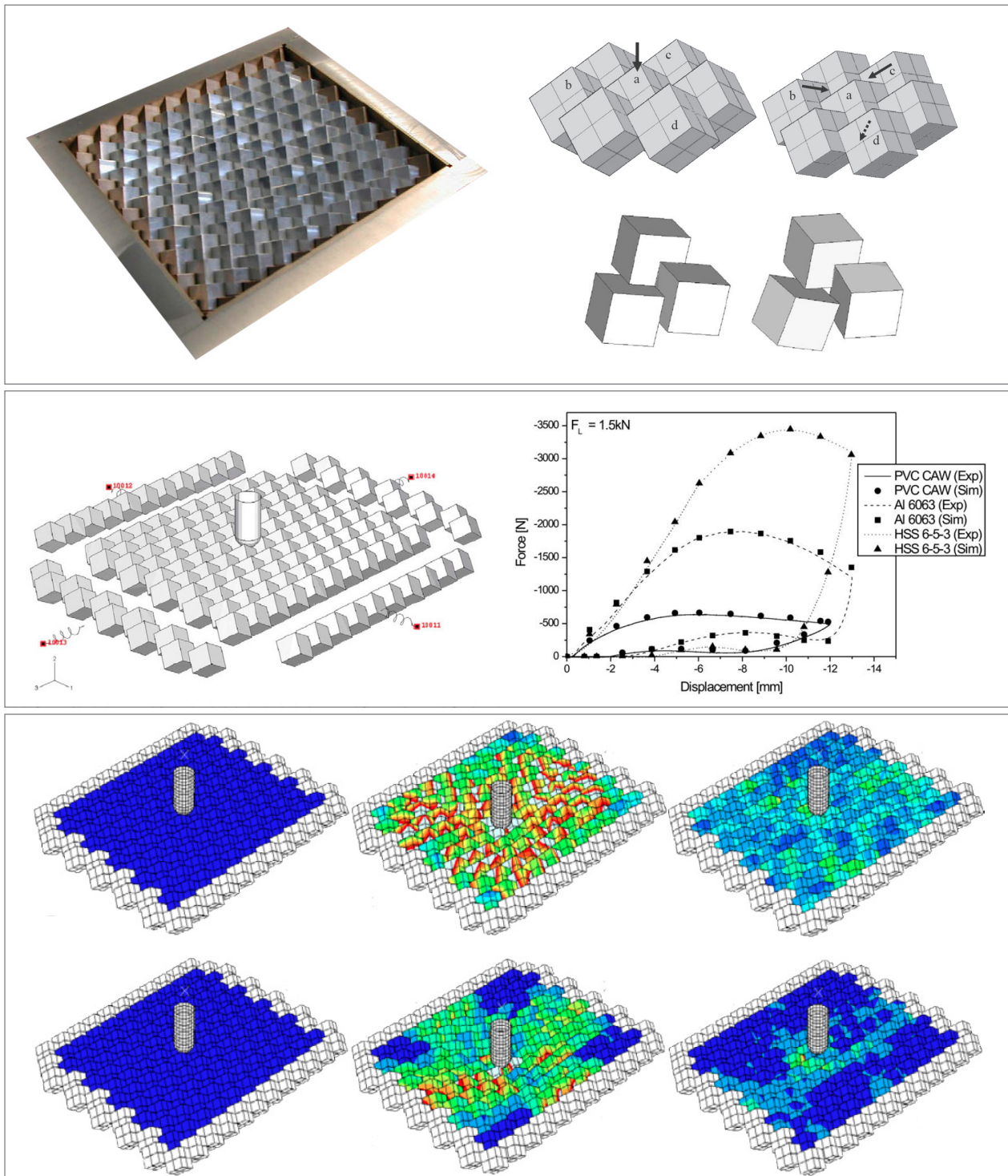
Come illustrato precedentemente, la progettazione di un involucro edilizio dotato delle proprietà di variabilità e dinamicità parametrica, nel rispetto dell'integrazione con la struttura portante esterna dell'edificio, si ispira alle ricerche matematiche sulle forme di aggregazione della materia. Partendo da un modulo costruttivo di base (*generative component*), dotato di una particolare forma geometrica, si ricorre al supporto di software per la modellazione e la rappresentazione degli elementi e delle superfici.

Infatti, i software basati sulle analisi di tipo non lineare, sempre più versatili ed accessibili, permettono di progettare e verificare il comportamento dell'involucro in tutti i suoi aspetti tecnici, strutturali ed energetici. A partire dalla modellazione tridimensionale del singolo elemento, è possibile simularne il comportamento sotto molteplici condizioni di carico e sollecitazione, ipotizzando l'impiego dei materiali innovativi proposti dal progetto di ricerca.

Soltanto in seguito a più dettagliate analisi dello stato tensionale del sistema costruttivo, combinato allo stato di sollecitazione dovuto all'azione di forze esterne applicate alla struttura, è possibile giungere alla definizione degli elementi costruttivi necessari al funzionamento del sistema costruttivo, in funzione della tipologia e delle capacità resistenti dell'elemento costruttivo studiato, e in relazione al contesto in cui esso è inserito.

Di seguito, si riporta una sintesi relativa al comportamento meccanico di sistemi bidirezionali basati sull'impiego della tecnica costruttiva di assemblaggio di elementi cubici autobloccanti TIM: in particolare, per tali sistemi si distinguono le strutture bidirezionali di orizzontamento (volta piana per solai e coperture) e quelle di partizione verticale (muri e pannelli di facciata).

Tale distinzione risulta necessaria per rilevare e descrivere le principali problematiche e potenzialità dei sistemi costruttivi TIM, a partire dalle quali è stata elaborata l'idea del sistema di involucro innovativo presentato all'interno di questo capitolo: esso, infatti, rappresenta una possibile applicazione del materiale geopolimerico studiato, isolante e massivo, che si presterebbe bene alla realizzazione di conci cubici da assemblare a secco per la realizzazione di pannelli prefabbricati di facciata dalle buone proprietà termiche e meccaniche, nel rispetto delle primarie istanze di ricerca del progetto.



[Fig. 31] (A sinistra) Modello costituito dall'assemblaggio di 10x10 cubi in alluminio, perimetrati da una cornice di contenimento; (a destra) schema di andamento delle forze scambiate reciprocamente tra le superfici di contatto dei cubi, che portano alla rotazione relativa tra un elemento di riferimento e i sei adiacenti.

[Fig. 32] Grafico forza-spostamento relativo a un sistema assemblato di 10x10 cubi di differenti materiali (PVC, alluminio, acciaio), sollecitato da un carico puntuale, concentrato nel punto centrale della volta piana: in particolare, si nota il ramo discendente di scarico, indice di rigidità negativa.

[Fig. 33] Rappresentazione degli spostamenti ortogonali al piano, a parità di forza puntuale applicata, al variare del solo coefficiente di attrito tra i cubi: (sopra) assemblaggio di cubi con coefficiente di attrito minore, (sotto) maggiore.

SISTEMI BIDIREZIONALI ORIZZONTALI: VOLTE PIANE

Le ricerche in letteratura riportano numerose analisi meccaniche relative al sistema TIM impiegato per la realizzazione di orizzontamenti, come solai e coperture. Qualora questo sistema costituito esclusivamente da cubi, privo di elementi di connessione o armatura, venga utilizzato per realizzare elementi bidirezionali orizzontali, necessita dell'inserimento di una cornice di contenimento per l'equilibrio delle forze generate per azione del peso proprio dei conci e delle sollecitazioni esterne ortogonali al piano.

Come anticipato precedentemente, il carattere frammentario delle strutture autobloccanti comporta significativi vantaggi in termini di resistenza della struttura. In primo luogo, la modularità consente di assemblare cubi identici ma costituiti da materiali differenti, rendendo possibile la realizzazione di strutture ibride.

Inoltre, la frammentarietà del sistema in elementi di piccole dimensioni agisce a favore della stabilità strutturale, in quanto la resistenza di un corpo costituito da un materiale fragile è inversamente proporzionale alle sue dimensioni: pertanto, riducendo le dimensioni degli elementi costruttivi da assemblare, si riduce anche la probabilità che essi presentino i fattori critici che potrebbero portare alla rottura.

Un ulteriore aspetto positivo delle strutture autobloccanti consiste nella presenza di superfici di interfaccia intermedie, che fungono da barriere di confinamento per il propagarsi delle fessurazioni che si vengono a creare normalmente, in seguito a sollecitazioni esterne. L'assenza di dispositivi di connessione tra i cubi, che agirebbero come elementi di trasmissione delle forze e propagazione preferenziale delle fessurazioni, comporta quindi il grande vantaggio di mantenere i problemi strutturali locali circoscritti ai singoli conci, senza condurre al collasso dell'intera struttura.

Il sistema autobloccante presenta inoltre una buona tolleranza all'assenza o al malfunzionamento dei suoi componenti costruttivi cubici che, seppur raggruppati in porzioni limitate e non diffuse del piano, possono arrivare a costituire circa il 25% dell'intera struttura.

La frammentazione comporta notevoli benefici anche in termini di dissipazione di energia, in quanto eventuali vibrazioni di grande ampiezza possono essere attenuate e smorzate grazie alla capacità dei singoli cubi di compiere ridotti movimenti relativi rispetto ai conci adiacenti, seppur con le limitazioni imposte dai vincoli cinematici del sistema. Questo aspetto acquista grande valore nell'ottica di interventi volti alla riduzione della vulnerabilità sismica, che generalmente ricorrono a sistemi costruttivi a secco e reversibili, senza l'impiego di malta in corrispondenza dei giunti. L'elevata capacità resistente del sistema così assemblato deriva soprattutto dalla facoltà dei singoli blocchi di subire piccoli movimenti all'interno della struttura durante l'azione di carichi, evitando il collasso del sistema sotto la sollecitazione di ampie vibrazioni e dissipando efficientemente l'energia durante il processo, grazie all'attrito tra i cubi. Questa proprietà risulta molto interessante

dal punto di vista sismico, in relazione a un buon comportamento meccanico durante l'azione di sollecitazioni esterne orizzontali.

Infine, la capacità degli elementi autobloccanti di sopportare limitati spostamenti ed eventuali rotazioni porta a riscontrare un inusuale comportamento meccanico di risposta, quale l'insorgere di una rigidezza negativa¹⁹, indipendentemente dalle proprietà fisico-chimiche del materiale di cui essi sono costituiti.

Secondo i dati raccolti in letteratura, è interessante notare come la rigidezza negativa si manifesti esclusivamente nei TIM costituiti da cubi: questa osservazione evidenzia l'importanza dell'inserimento di un elemento di contenimento periferico per gli elementi costruttivi orizzontali, al fine di equilibrare la rigidezza positiva della cornice, nel bilancio dell'energia del sistema globale. Calibrando le caratteristiche dell'elemento di contenimento perimetrale, è possibile controllare la rigidezza del sistema e, dunque, la sua capacità portante nella direzione normale al piano [Fig. 32].

La rigidezza negativa, rilevata in seguito all'applicazione del carico puntuale, nel tradizionale grafico forza-spostamento, si manifesta sotto forma di ramo discendente di scarico subito dopo il picco della curva di carico, nel caso di spostamenti sia positivi (fase di carico) che negativi (scarico). L'insorgere di una rigidezza negativa durante la fase di scarico e la conservazione di un'integrità del sistema rappresentano le principali caratteristiche di questo fenomeno. Inoltre, un'altra caratteristica di particolare interesse dei sistemi TIM costituiti da cubi consiste nella dissipazione di energia attribuibile all'attrito tra le superfici di contatto degli elementi.

Questa rigidezza negativa, presentata esclusivamente dai sistemi assemblati di cubi autobloccanti, mette in rilievo l'importanza del vincolo esterno, costituito dalla cornice esterna di contenimento [Fig. 31]: non esistono infatti materiali dotati di rigidezza negativa, in quanto tutti sono intrinsecamente instabili, per via dell'assenza di elementi attribuibili alla presenza di energia positiva. Pertanto, la cornice di contenimento funge da elemento stabilizzante, dotato della rigidezza positiva necessaria per definire il sistema TIM positivo. Naturalmente, in termini quantitativi, il particolare comportamento meccanico del sistema assemblato dipende dal rapporto tra la rigidezza del materiale di cui sono costituiti i cubi e quella del materiale con cui è realizzata la cornice.

¹⁹ “Generalmente, la rigidezza di un materiale agisce generando una forza qualora subentri qualcosa che tenti di deformare l'oggetto che esso costituisce. Tale comportamento viene generalmente associato al termine di *rigidezza positiva*, attribuita agli oggetti che oppongono resistenza alle sollecitazioni esterne volte a modificare la loro configurazione. Con il termine *rigidezza negativa*, invece, ci si riferisce a una proprietà tale per cui, in seguito a una sollecitazione esterna, si genera una forza che amplifica la deformazione.

Per comprendere in maniera intuitiva il concetto di *rigidezza negativa*, si può prendere un classico righello di plastica flessibile, posto verticalmente su un piano: applicando con la mano una pressione progressiva all'estremità superiore, ossia applicando un carico di punta sempre maggiore, si arriva a un punto in cui il righello si piega a “U”. Se, con un altro dito, si spinge in senso contrario allo spanciamento del righello, ossia si applica un carico puntuale in corrispondenza del punto di massima flessione, si osserva che il righello acquista una forma ad “S”, prima di ritornare alla “U” rovescia rispetto a quella di partenza, qualora si continui a spingere: a questo comportamento viene attribuito il termine *rigidezza negativa*.” (M. May, *Getting more stiffness with less*, in “American Scientist”).

Quando i cubi sono sottoposti a un carico trasversale rispetto al piano della volta di cubi, l'elemento di riferimento (a) su cui è direttamente applicato il carico puntuale spinge contro gli elementi adiacenti (b, c, d) [Fig. 31]. La deformazione del sistema, grazie alle rotazioni relative che si verificano tra i cubi autobloccanti, consente di trasferire il carico puntuale e di trasformare l'energia cinetica da esso proveniente in energia elastica, permettendo di immagazzinarla in corrispondenza dei sei elementi direttamente coinvolti nel movimento.

Come anticipato precedentemente, le rotazioni e gli scivolamenti relativi tra i conci cubici dipendono non solo dal modulo di Young e dalle proprietà elastiche del materiale, ma anche dal coefficiente di attrito tra le superfici di contatto degli elementi. Naturalmente, all'aumentare del coefficiente, diminuisce il numero e l'entità dei movimenti tra i cubi e, dunque, si riduce la freccia massima della volta in corrispondenza del punto centrale, in cui viene applicato il carico concentrato [Fig. 33]. In generale, come dimostrano le fonti in letteratura, a parità di modulo di Young, un aumento del coefficiente di attrito comporta un aumento della tensione massima ammissibile del sistema assemblato. Al contempo, a parità di coefficiente di attrito, un aumento del modulo di Young del materiale comporta un aumento della tensione massima ammissibile della struttura TIM²⁰.

Prima di procedere all'analisi del modello specifico impiegato sotto forma di pannello per la realizzazione di partizioni verticali di facciata, al fine di una migliore comprensione del sistema costruttivo TIM, si riporta l'analisi meccanica del sistema appena esposto, costituito da un insieme di cubi autobloccanti perimettrati da una cornice di contenimento per la ripresa degli sforzi di compressione.

In generale, il comportamento delle strutture autobloccanti così configurate è assimilabile a quello di una piastra appoggiata ai bordi, soggetta a una compressione perimetrale q agente nello stesso piano della piastra²¹ [Fig. 34].

In una piastra, le tensioni principali risultano massime in uno o pochi punti, rendendo di conseguenza tutti gli altri elementi del sistema sottoposti a sforzi minori di sollecitazione, entro i valori di tensione ammissibile. Caricando maggiormente la piastra, gli elementi più sollecitati si plasticizzano, ridistribuendo le tensioni: nelle strutture bidirezionali, tale redistribuzione può avvenire su una porzione più ampia rispetto a quanto accada nelle strutture monodimensionali, aumentando la riserva di resistenza della struttura. Questa riserva di resistenza è ulteriormente accresciuta dall'azione di membrana: se lo spostamento verticale non è trascurabile rispetto allo spessore della piastra, non è più lecito considerare il piano medio indeformabile e si vengono a generare delle tensioni di trazione.

20 Khor H. C., *Mechanical and structural properties of interlocking assemblies*, Master Degree at School of Civil and Resource Engineering - University of Western Australia, October 2008, p.37.

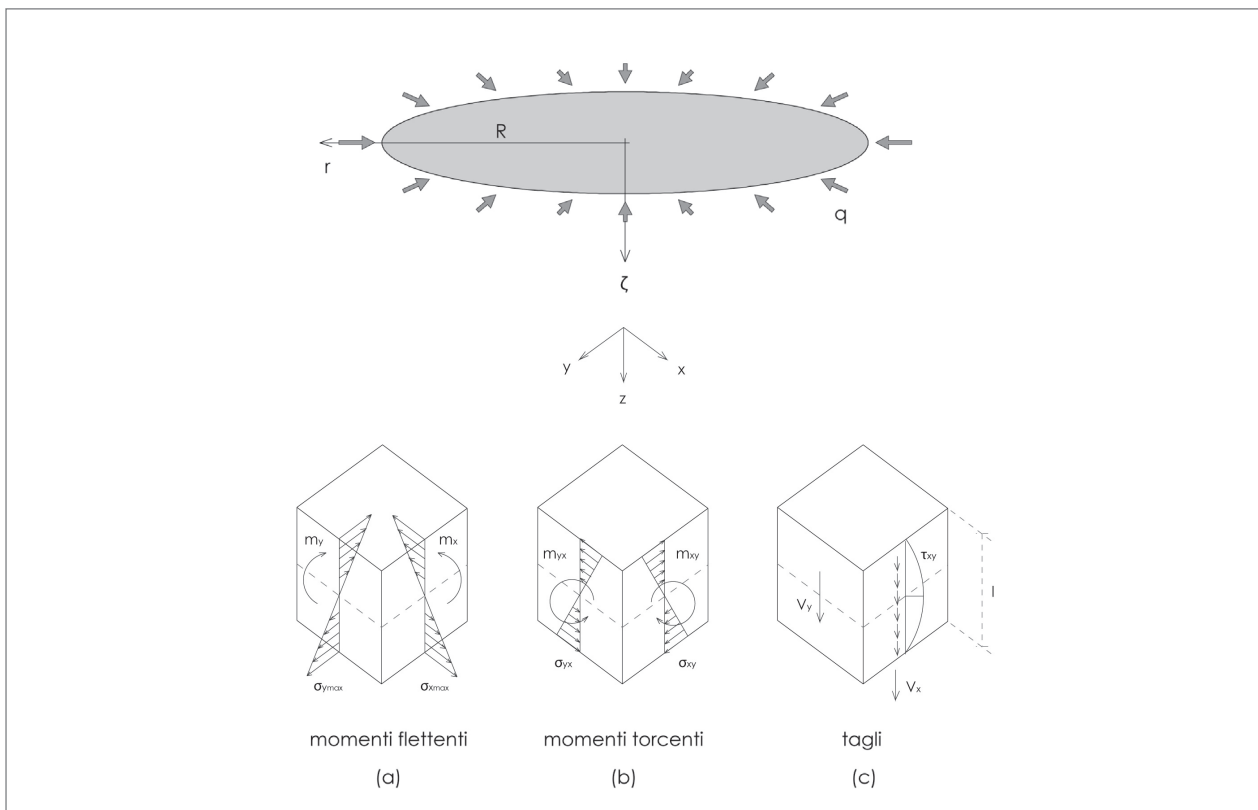
21 Khor H. C., Dyskin A. V., Estrin Y., Pasternak E., *Mechanisms of fracturing in structures built from topologically interlocked blocks*, in "Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04) Proceedings", Brisbane (Australia), 26-29 September 2004, Editors A. Atrens, J. N. Boland, R. Clegg, J. R. Griffiths, pp. 189-194.

La teoria elastica applicata alle piastre si fonda su una serie di ipotesi:

- spessore minore di un quinto della luce ($s < L/5$);
- spostamenti minori di un quinto dello spessore ($\Delta < s/5$);
- materiale omogeneo e isotropo;
- comportamento elastico-lineare secondo la legge di Hooke ($\sigma = E \cdot \varepsilon$);
- conservazione della planarità della sezione del piano medio;
- planarità degli stati di sforzo, mediante l'assunzione di un sistema di riferimento (x, y, z) tale da poter trascurare le tensioni normali e tangenziali nei piani xz e yz ($\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$).

Ogni elemento della piastra è sollecitato da cinque azioni interne incognite [Fig. 34]:

- due momenti flettenti m_x e m_y agenti sulle facce della piastra, che forniscono una distribuzione normale delle tensioni σ_x e σ_y ;
- un momento torcente $m_{xy} = m_{yx}$ generato dalle tensioni tangenziali, agente sulle facce ortogonali, che generano una distribuzione tangenziale delle tensioni τ_{xy} ;
- due forze di taglio V_x e V_y ortogonali al piano della piastra che contribuiscono insieme ai momenti torcenti alla distribuzione tangenziale delle tensioni τ_{xy} .



[Fig. 34] (Sopra) Schema di una piastra appoggiata sui bordi e soggetta a una compressione perimetrale q ; (sotto) schema delle azioni interne e delle tensioni in una piastra.

La presenza di queste componenti di sollecitazione caratterizza il funzionamento delle piastre, che si basa su due meccanismi resistenti flessionali lungo due direzioni ortogonali fra loro, e su un meccanismo torsionale. L'equilibrio della piastra avviene mediante l'annullamento delle forze verticali e dei momenti risultanti rispetto agli assi x e y , come espresso dall'equazione della superficie elastica che esprime l'equilibrio della piastra:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} = \frac{p}{B}$$

In questa equazione, $p = p(x,y)$ è il carico distribuito per unità di superficie che agisce sulla piastra e B è la rigidezza flessionale della piastra, pari a:

$$B = \frac{F \cdot t^3}{12 (1 - \nu^2)}$$

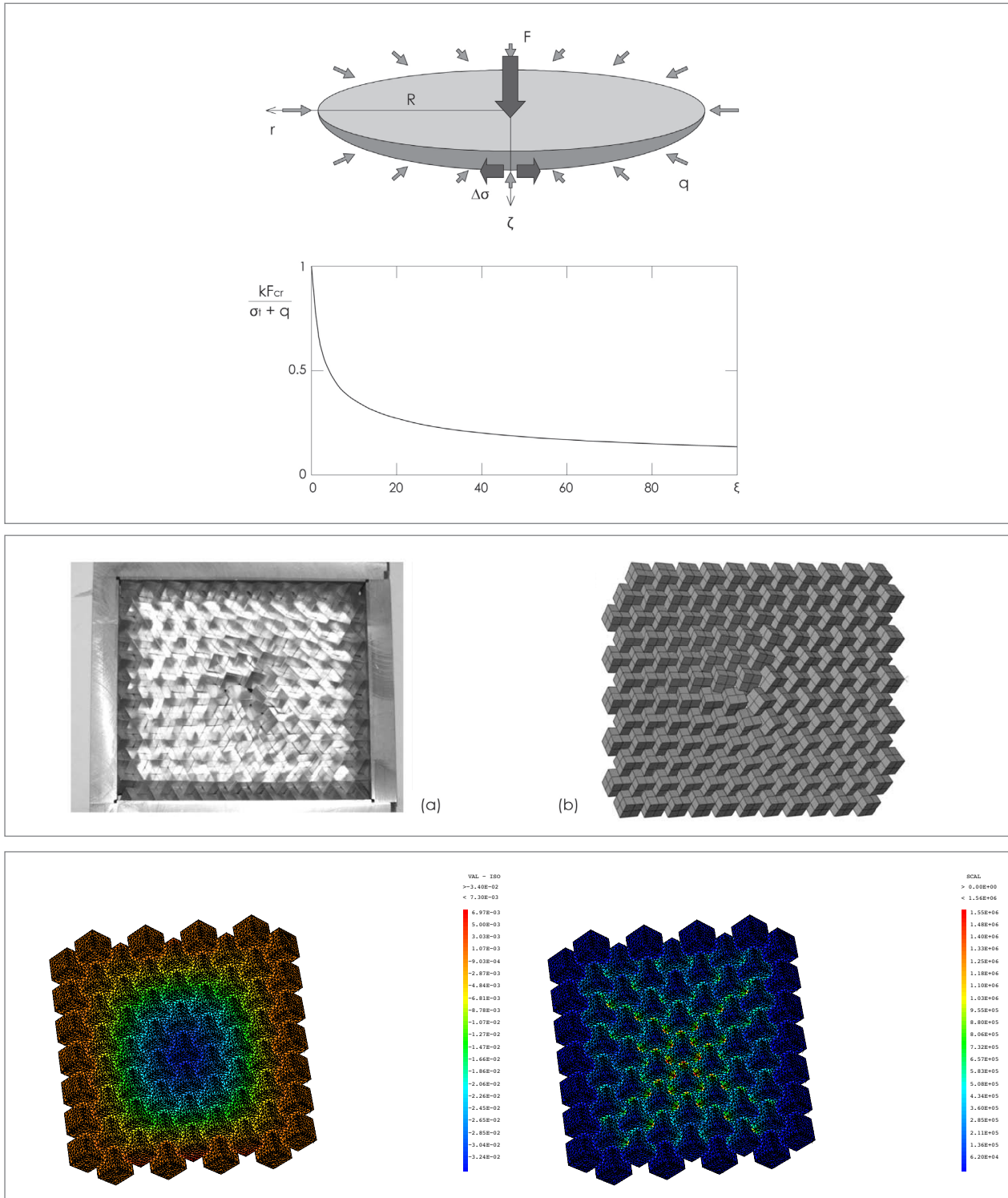
L'equazione della superficie elastica di una piastra risulta molto simile all'equazione della linea elastica di una trave inflessa, ma differisce da quest'ultima per la presenza della flessione trasversale e della torsione. Inoltre, la rigidezza flessionale B della piastra comporta l'effetto irrigidente dovuto alla continuità strutturale delle varie fasce in cui si può pensare di suddividere la piastra. Le deformazioni risultano infatti ridotte, poiché il termine B è inversamente proporzionale a $(1-\nu^2)$, che aumenta la rigidezza della piastra.

Risolvendo l'equazione della superficie elastica con le condizioni al contorno, si ottiene lo spostamento $W(x,y)$ e, di conseguenza, la distribuzione delle azioni interne.

Analogamente agli stati tensionali piani, nel piano medio della piastra lungo il quale si definiscono gli assi principali, i momenti flettenti raggiungono il valore massimo, mentre i momenti torcenti risultano nulli. Trascurando la tensione σ_z , è possibile definire ogni strato della piastra parallelo al piano xy come uno stato tensionale piano ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$) a cui si associa uno stato tensionale principale (σ_1 e σ_2 inclinate rispetto all'asse x , secondo il criterio di Mohr). Dal momento che le tensioni variano linearmente lungo lo spessore, gli stati tensionali variano in modulo mantenendo le medesime direzioni principali, mentre i momenti principali lungo gli assi corrispondono a quello massimo positivo e negativo.

Esistono dunque due direzioni principali lungo le quali le sollecitazioni flessionali risultano essere massime e minime, per cui i tagli sono nulli: pertanto, è possibile tracciare le isostatiche, ossia le linee delle tensioni principali, che rappresentano l'andamento delle tensioni di flessione nella piastra. Poiché lungo le isostatiche non si sviluppano azioni di taglio, la piastra può anche essere considerata come una griglia di travi curve ortogonali fra loro, che non trasmettono carichi alle travi adiacenti per azione di taglio²².

22 Salvadori M., *Le strutture in architettura*, Etas Kompass, Milano 1964.



[Fig. 35] (In alto) Schema di una piastra poggiata sui bordi, soggetta a una compressione perimetrale q e a una forza F verticale concentrata; (sotto) diagramma che rappresenta il carico di rottura normalizzato $kF_{cr}/(\sigma_t+q)$ in funzione di ξ .
 [Fig. 36] (Al centro) Localizzazione delle rotazioni osservate sperimentalmente sul modello reale in alluminio di Fig. 27 (a) e simulazione svolta su un modello geometrico virtuale (b).
 [Fig. 37] (In basso) Analisi meccanica svolta con il software *Cast3M* della volta piana appoggiata ai bordi: diagramma degli spostamenti verticali massimi (a sinistra) e diagramma delle tensioni di Von Mises (a destra).

Per comprendere a fondo il comportamento meccanico dei sistemi autobloccanti, si immagina una piastra vincolata ai bordi e soggetta a uno sforzo di compressione perimetrale, al centro della quale si applica una forza verticale F diretta verso il basso [Fig. 35]. Per una simil-piastra basata su un sistema autobloccante, lo sforzo provocato causa delle fratture per moduli della forza maggiore del valore $(\sigma_t + q)$. La differenza più evidente tra il comportamento di un sistema autobloccante e quello di una piastra analoga, in materiale omogeneo, riguarda l'entità della deformazione registrata: nel sistema TIM, si riscontrano deformazioni molto maggiori rispetto a quelle della piastra, confermando la caratteristica di scarsa rigidità a flessione delle strutture autobloccanti. [Fig. 36, 37]

Nel caso di un orizzontamento costituito da cubi TIM, le deformazioni riscontrate sono notevoli, andando a invalidare l'ipotesi di piccoli spostamenti alla base della teoria della piastra. Per la teoria delle membrane, si ha che per grandi deformazioni di una piastra incastrata ai bordi e caricata in un punto, anche il piano neutro sarà soggetto a una tensione, a differenza di quanto accade per la deformazione cilindrica di una piastra o di una trave²³.

Si consideri ad esempio una lamina circolare deformata, a formare una calotta sferica. Se la deformazione modifica la lunghezza della circonferenza, il diametro resta invariato, mentre se la circonferenza rimane invariata, il diametro varia in lunghezza, generando tensione. Quando la deformazione è ridotta, questa tensione risulta trascurabile, mentre diventa di una certa entità quando la deformazione $\zeta(r)$, comparata allo spessore della piastra, non risulta più così piccola. Lo sforzo membranale $\Delta\sigma$ indotto dalla deformazione della piastra $\zeta(r)$ va così a contrastare l'effetto stabilizzante della pressione esterna, riducendo la resistenza alla frattura della struttura.

Partendo da questa ipotesi, nel caso della prova di carico puntuale, il carico di rottura per un sistema autobloccante è calcolabile mediante la formula:

$$F_{cr} = \frac{\sigma_t + q}{k\xi} [\sqrt{1+2\xi} - 1] \quad \xi = 2k \frac{R^2 (\sigma_t + q)}{k^2 E h^6}$$

dove σ_t è la tensione di rottura del materiale; R è il raggio della piastra; q è la pressione esterna; E è il modulo di Young effettivo della struttura; k è la costante di proporzionalità tra la tensione σ_f generata dal carico puntuale e la forza applicata F .

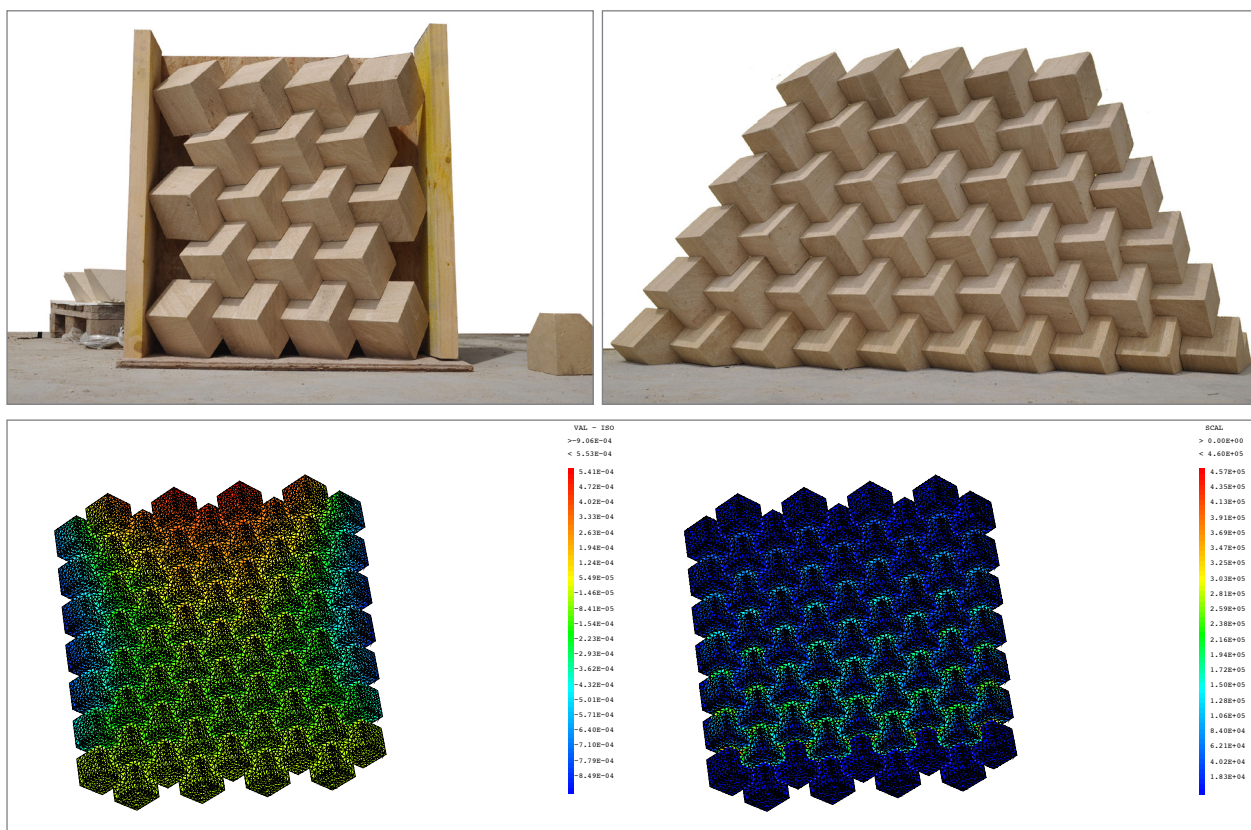
Dal grafico in figura [Fig. 35] si nota che la dipendenza del carico di rottura normalizzato $kF_{cr}/(\sigma_t + q)$ dipende da ξ : quando E diminuisce, il carico di rottura tende a zero. Questo è il motivo per cui per le strutture autobloccanti, caratterizzate da bassi valori del modulo di Young, si registrano dei carichi di rottura decisamente ridotti rispetto a quelli delle piastre omogenee. Grazie alle proprietà intrinseche geometriche del sistema, per le strutture autobloccanti l'inizio della fratturazione non porta al collasso della struttura.

23 Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., *Theory of plates and shells*, McGraw-Hill, New York 1959.

SISTEMI BIDIREZIONALI VERTICALI: MURI E PANNELLI DI FACCIATA

All'interno dell'ambito delle analisi volte a comprendere a fondo il comportamento del sistema autobloccante TIM costituito da cubi, si vuole ora passare al sistema verticale di facciata, sotto forma di muro autoportante e di pannelli portati mediante un sistema di ancoraggio meccanico puntuale, grazie al quale essi vengono appesi alla sommità dell'edificio esistente.

Analogamente a quanto studiato e approfondito dai testi in letteratura per gli orizzontamenti, si può ipotizzare l'utilizzo di tale sistema posto verticalmente, a costituire un elemento costruttivo di chiusura verticale per la realizzazione di una seconda pelle di involucro da giustapporre agli edifici esistenti, adeguatamente ancorata alla facciata esistente. Naturalmente, in questo caso, la forza di sollecitazione esterna ortogonale al piano del pannello è costituita dal vento e dal sisma.



[Fig. 38] (Sopra, a sinistra) Prima prototipazione del sistema autobloccante in pietra: porzione di facciata di forma rettangolare, dotata di due elementi di rinfiaccio per il contenimento delle spinte laterali verso l'esterno.

[Fig. 39] (Sopra, a destra) Seconda prototipazione del sistema autobloccante in pietra: porzione di facciata di forma trapezoidale, priva di alcun elemento di supporto o contenimento perimetrale.

[Fig. 40] Analisi meccanica svolta con il software *Cast3M* del pannello costituito da cubi, disposto verticalmente, appoggiato a terra, privo di elementi laterali di contenimento, e caricato dal peso proprio: diagramma degli spostamenti massimi ortogonali al piano massimi (a sinistra) e diagramma delle tensioni di Von Mises (a destra).

Dal punto di vista delle reazioni vincolari che caratterizzano un sistema autobloccante bidirezionale disposto verticalmente, così configurato, si notano alcune differenze sostanziali tra i vincoli interni ed esterni e quelli presenti in una analoga volta piana, disposta orizzontalmente.

Infatti, mentre un solaio costituito da cubi TIM può essere associato a una piastra vincolata con un sistema di appoggio in corrispondenza dei bordi, un pannello verticale analogo può essere concepito come un sistema “a cortina”, appeso all’estremità superiore. Pertanto, il comportamento meccanico del sistema può essere assimilato a quello di una trave inflessa, vincolato da una cerniera all’estremo superiore e da un carrello all’estremo inferiore.

La differenza sostanziale alla base della concezione del sistema risiede nel ruolo della cornice esterna di confinamento della porzione di facciata che, nel caso di una chiusura verticale, non risulta necessaria per la stabilità del sistema.

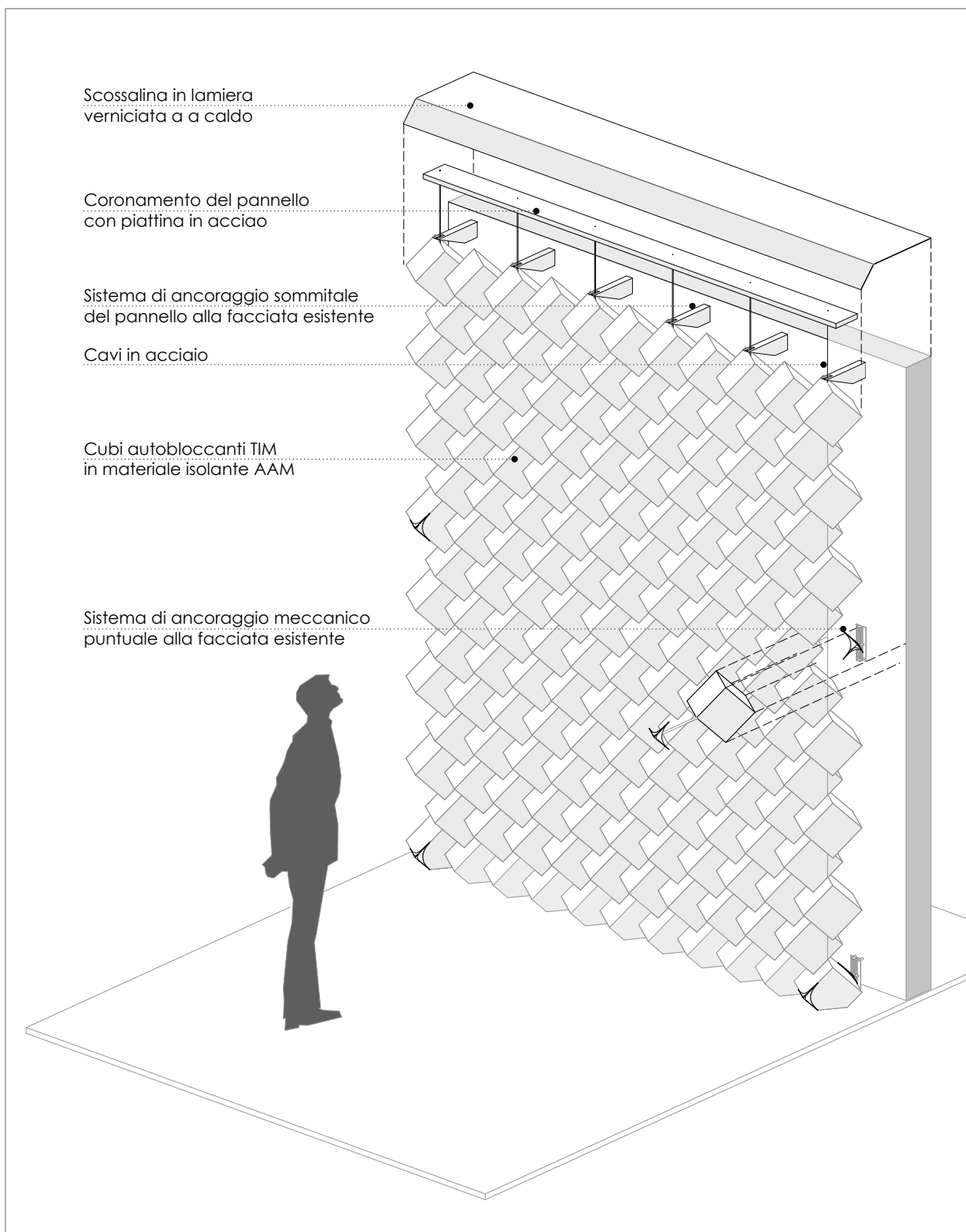
Infatti, per un sistema autobloccante TIM disposto verticalmente, si nota come ogni concio trasferisca la propria forza peso ai cubi immediatamente sottostanti, su cui poggia. Procedendo quindi per file successive, dal basso verso l’alto, come in qualsiasi sistema funzionante a gravità, è possibile procedere alla realizzazione di una struttura verticale dotata di una grande stabilità e resistenza, grazie al peso proprio di ogni singolo concio e al sistema di autobloccaggio dato dalle proprietà geometriche, che conferisce integrità e solidità al sistema. Si può quindi procedere all’elevazione di un muro portante, anche di notevole altezza (in funzione della dimensione dei cubi), senza dover ricorrere a una cornice di contenimento.

Naturalmente, procedendo alla realizzazione di una porzione di facciata di forma rettangolare, senza l’utilizzo di alcun elemento aggiuntivo di connessione fra i conci, i cubi disposti lateralmente poggiano soltanto su un cubo (e non su due cubi, come i conci interni), lasciando una piccola porzione in aggetto che li destabilizza.

Come si vede in figura [Fig. 40], infatti, lo spostamento massimo per questo sistema si verifica in corrispondenza delle due fasce laterali, a dimostrazione della necessità di inserire un elemento di contenimento perimetrale per equilibrare il sistema e garantire l’integrità della struttura.

Al fine di far fronte a questo sbilanciamento per procedere all’assemblaggio completo di ogni fila orizzontale, è necessario predisporre due strutture di rinfilanco per il contenimento delle spinte dovute agli aggetti dei cubi: questa soluzione è stata adottata durante la prima sperimentazione costruttiva svolta a Troyes [Fig. 38]. In alternativa, volendo rinunciare all’utilizzo di due pareti di rinfilanco, la porzione di muro realizzabile presenta inevitabilmente una forma trapezoidale [Fig. 39].

Nonostante l’adozione di questi espedienti impiegati durante la prima sperimentazione costruttiva svolta a Troyes, la problematica sollevata non può considerarsi risolta mediante alcuno di questi due metodi, in quanto il progetto di ricerca è volto alla progettazione di pannelli di facciata, da applicare esternamente all’involucro di edifici già esistenti. Pertanto, i requisiti di regolarità geometrica e stabilità del sistema risultano fondamentali per la modulazione del disegno di facciata.



[Fig. 41] Vista assonometrica del pannello di facciata applicato a un edificio scolastico di un solo livello, con dettaglio esploso del sistema di ancoraggio meccanico puntuale in sommità (vincolo doppio), e alla base e ad altezza intermedia (vincolo semplice) (rif. schema statico Fig. 43).

Per rispondere a queste prerogative sulla validità della soluzione, si decide di inserire dei cavi sottili in acciaio, disposti verticalmente, alloggiati all'interno di piccoli fori passanti per i baricentri dei cubi, ogni due colonne di cubi. In questo modo è possibile elevare un muro procedendo per file orizzontali, facendo scorrere i cubi lungo i cavi, analogamente al procedimento per infilare le perle nel filo di una collana.

Una volta terminata la struttura e fissati i cavi all'estremità superiore del pannello, mediante un elemento di coronamento e di connessione delle armature, quando il sistema viene sollevato dall'alto, i cavi cominciano a lavorare a trazione, equilibrando le forze di compressione scambiate tra i conci, dovute ai loro pesi propri. Il pannello così configurato garantisce una buona integrità del sistema, evitando di dover ricorrere all'inserimento di una cornice esterna di confinamento che comporterebbe ulteriori spese in termini di impiego di materiale e tempo di fabbricazione.

La proposta progettuale prevede infatti di inserire all'interno del muro di cubi dei cavi di acciaio che, una volta trazionati, vadano ad equilibrare gli sforzi di compressione scambiati reciprocamente dai cubi costituenti il sistema autobloccante [Fig. 41]. L'idea progettuale riguarda quindi la realizzazione di un sistema di facciata basato su un tipo di tecnologia autobloccante per la realizzazione di pannelli dotati di elevata deformabilità e resistenza e, al contempo, di un design architettonico esteticamente valido. Come esposto sopra, le grandi deformazioni e la scarsa rigidità a flessione del sistema, che contraddistinguono il sistema, rendono le strutture TIM notevolmente sollecitate: questo fattore comporta l'esposizione al rischio di collasso per insufficienza di equilibrio della pressione perimetrale esterna, nel caso dei solai, o per insufficienza di equilibrio dell'azione di trazione dei cavi di armatura interna, nel caso dei pannelli di facciata.

Questi cavi metallici disposti verticalmente sono fissati alla base del pannello, costituita da conci cubici appositamente sagomati, in modo tale da presentare una superficie piana regolare di appoggio a terra. Infine, una volta ultimata l'elevazione del muro, i cavi sono fissati anche all'estremità superiore mediante un sistema di serraggio che consente di mantenere i cavi tesi e di procedere successivamente al sollevamento della struttura.

Si introduce quindi un nuovo carattere alla classica concezione della struttura autobloccante, che generalmente non prevede l'utilizzo di dispositivi di connessione tra i blocchi, al fine di consentire una maggiore integrità e resistenza meccanica al sistema, oltre che una reale applicazione del sistema costruttivo come pannello di facciata da appendere alla sommità dell'edificio esistente oggetto di intervento.

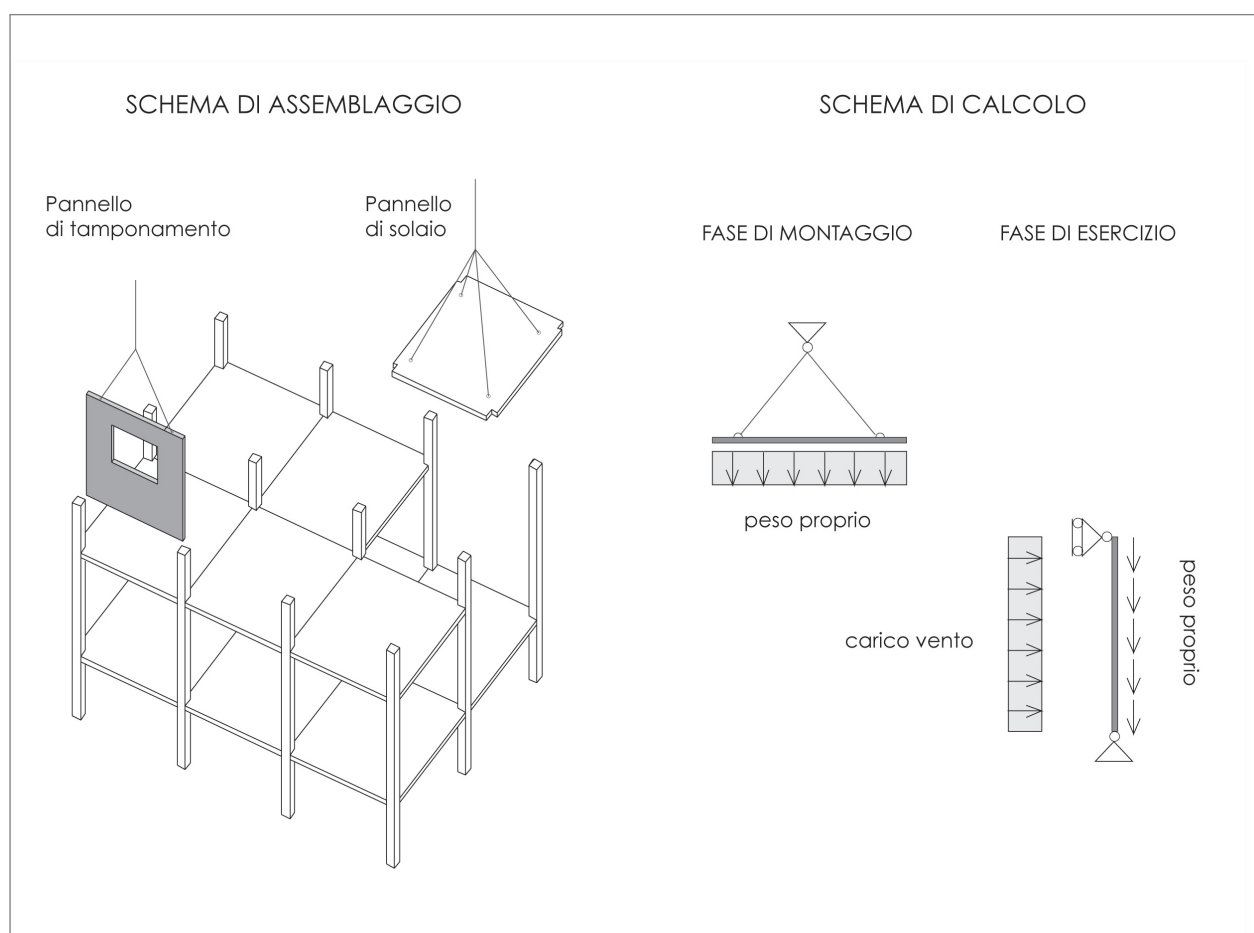
Fatta questa precisazione sull'orientamento della struttura autobloccante bidirezionale oggetto di studio e sulle relative caratteristiche geometriche e strutturali, si può procedere all'analisi delle proprietà meccaniche del sistema bidirezionale così configurato, il cui comportamento è assimilabile a quello di una trave appoggiata agli estremi.

Come visto precedentemente, il comportamento meccanico di questo sistema di facciata ap-

peso all'estremità superiore dell'edificio (per esempio in corrispondenza della gronda) e ancorato alla facciata esistente ad entrambe le estremità, mediante appositi connettori, può essere assimilato a quello di una trave appoggio-appoggio.

Durante l'analisi assiale dei carichi, si determina l'intensità e la distribuzione di tutti i possibili carichi agenti che, in funzione dello schema statico adottato, possono portare a differenti configurazioni di carico e, dunque, a diversi schemi di calcolo: tra le varie situazioni, occorre scegliere sempre quella più sfavorevole e gravosa, capace di provocare le sollecitazioni maggiori nell'elemento strutturale.

Inoltre, occorre osservare che non sempre le condizioni di carico e di vincolo rimangono le stesse in tutte le fasi della vita strutturale: ad esempio, il pannello di tamponamento rappresentato nell'immagine [Fig. 42] risulta inflesso dal solo peso proprio durante la fase di montaggio, mentre risulta inflesso dall'azione del vento e compresso dal peso proprio durante la fase di esercizio.



[Fig. 42] Schema di assemblaggio e schema statico di un pannello di tamponamento prefabbricato durante la fase di montaggio e di esercizio.

Uno dei fattori fondamentali da considerare durante la progettazione di elementi di chiusura verticale riguarda proprio l'azione del vento, in funzione della zona geografica, delle condizioni locali di clima e di esposizione, della forma e delle dimensioni dell'edificio. Considerato orizzontale e spirante nella direzione di uno degli assi principali d'inerzia della pianta dell'edificio, il vento produce un insieme di pressioni e depressioni ortogonali alle pareti. La pressione del vento [N/m²] sulle pareti può essere valutata punto per punto, mediante l'espressione fornita dalle norme NTC 2008:

$$p = p_b \cdot c_e \cdot c_p \cdot c_d$$

dove p_b è la pressione di riferimento che dipende dalla zona geografica, dall'altitudine e dalla conformazione geografica del terreno in cui è collocata la struttura; c_e è il coefficiente di esposizione; c_p è il coefficiente di forma; c_d è il coefficiente dinamico.

Un ulteriore fattore da considerare riguarda l'eccentricità dei pannelli di facciata, caratterizzati da uno spessore limitato in rapporto all'altezza, che assai raramente sono soggetti a uno sforzo normale centrato. Di conseguenza, le verifiche di resistenza nei confronti dei carichi verticali devono tenere conto delle azioni flessionali e del periodo di instabilità dell'equilibrio.

La trattazione di questo tema vasto e complesso si fonda sulla definizione del piano medio del pannello, ossia quello contenente il baricentro della sezione verticale resa omogenea del pannello stesso, supposto che le caratteristiche della sezione e del materiale non siano variabili lungo l'altezza. Le eccentricità dello sforzo normale, che possono essere generate da molteplici cause (discontinuità del sistema di ancoraggio alla facciata esistente, disassamento dell'asse del giunto verticale, irregolarità proveniente da imperfezioni di fabbricazione), vengono riferite al piano medio.

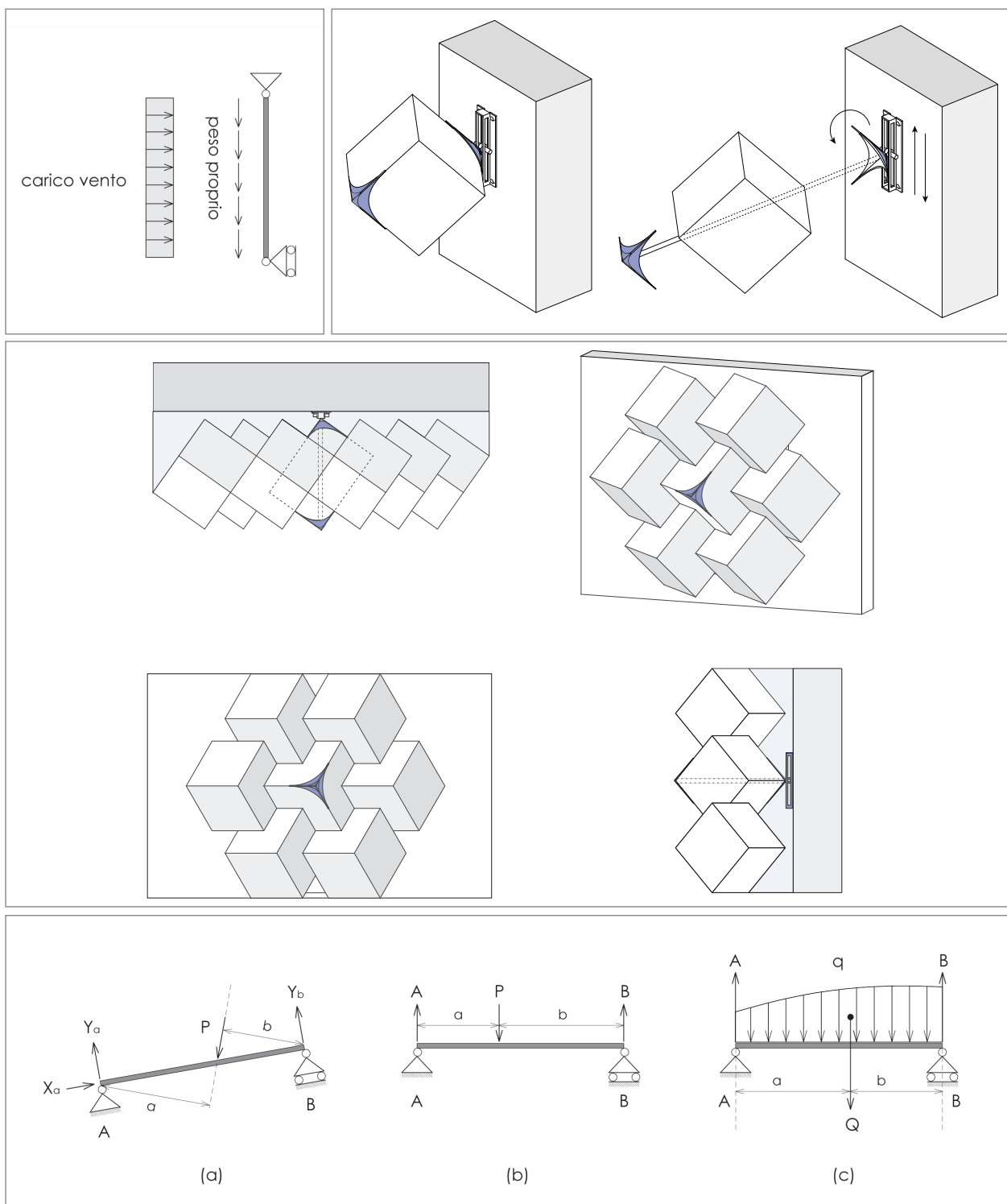
Riferimenti teorici, talvolta sostenuti anche grazie al supporto di indagini sperimentali svolte su pannelli a scala reale, hanno dato luogo a un procedimento di verifica della resistenza sostanzialmente basato sul calcolo del carico limite a sforzo normale N_u come frazione del carico di rottura N_o valutato in assenza di eccentricità e di fenomeni di instabilità²⁴.

Posto $N_o = R'_{bk} A$, dove A è l'area della sezione trasversale resistente e R'_{bk} è la resistenza caratteristica del materiale di cui il pannello è costituito, il carico effettivo a rottura N_u viene assunto uguale a:

$$N_u = \varphi(e_o/s, \lambda) N_o$$

dove $\varphi < 1$ è funzione del rapporto tra l'eccentricità equivalente e_o e lo spessore del pannello s , oltre che della snellezza del pannello λ .

24 Pozzati P., *Teoria e tecnica delle strutture*, UTET, Torino 1980.



[Fig. 43] Schema statico di un pannello di tamponamento, appeso in sommità, durante la fase di esercizio.

[Fig. 44] Schema assonometrico del sistema di ancoraggio dei pannelli di tamponamento alla facciata esistente: vincolo semplice (carrello) che consente la rotazione e la traslazione verticale.

[Fig. 45] Viste del sistema di ancoraggio dei pannelli di tamponamento alla facciata esistente.

[Fig. 46] Schemi statici di una trave appoggiata, inclinata (a) o orizzontale (b), sollecitata da una forza puntuale P e di una trave appoggiata orizzontale (c) sollecitata da un carico ripartito q .

La snellezza è definita come:

$$\lambda = l_f / (s \sqrt{\alpha})$$

dove la lunghezza libera di inflessione l_f e il coefficiente α sono definiti dalle espressioni:

$$l_f = k.l \qquad \alpha = \frac{E'_b}{R'_{bk}(1 + \beta \cdot \xi)}$$

dove k rappresenta un coefficiente variabile in funzione dei vincoli esterni del pannello (vincolato lungo uno o più bordi) e del rapporto fra altezza e larghezza del pannello l/b ; E'_b rappresenta il modulo di elasticità istantaneo del materiale, in funzione di R'_{bk} ; β è il coefficiente che tiene conto delle deformazioni differite del materiale; ξ rappresenta il rapporto tra il carico permanente e quello totale.

Sulla base di queste valutazioni, si può quindi procedere all'analisi meccanica del sistema di facciata attraverso l'adozione di uno schema statico ad esso assimilabile.

Come esposto all'interno della parte introduttiva, il progetto di ricerca si rivolge a una precisa tipologia di patrimonio edilizio esistente: quello scolastico, realizzato durante gli anni 1960-80, secondo le moderne tecniche di prefabbricazione in conglomerato cementizio armato. Si tratta di edifici caratterizzati da una ridotta elevazione, a uno o due piani, e dotati di una elevata modularità della struttura e dei pannelli di tamponamento.

Considerando di applicare il sistema di rivestimento proposto, costituito da cubi autobloccanti armati da cavi in acciaio alloggiati al loro interno, sotto forma di pannelli di altezza l , pari all'altezza del piano, e di larghezza b , pari alla luce regolare fra gli interassi dei pilastri, si può ipotizzare un singolo o doppio ordine di pannellatura (rispettivamente per gli edifici di uno o due piani), ancorato alla facciata esistente mediante un idoneo sistema di connessione.

In particolare, si pensa di poter applicare ogni pannello così configurato, come nel disegno esecutivo riportato precedentemente, mediante un sistema di ancoraggio che consenta di appenderlo alla sommità, naturalmente soltanto dopo aver svolto le opportune verifiche di resistenza meccanica. Si ipotizza che tale sistema possa essere ancorato alla struttura portante dell'edificio esistente in corrispondenza dei punti maggiormente resistenti: si prevede che l'ordine inferiore di pannellatura sia connesso a una trave di rinforzo adeguatamente dimensionata, collocata esternamente alla facciata, in corrispondenza del solaio di interpiano; mentre l'ordine superiore di pannellatura può essere connesso alla facciata esistente in corrispondenza del cordolo di sommità dell'edificio.

Come rilevato precedentemente, il comportamento meccanico di questo sistema di facciata, appeso all'estremità superiore e ancorato alla facciata esistente ad entrambe le estremità mediante appositi connettori, può essere assimilato a quello di una trave appoggio-appoggio, vincolata come nello schema statico riportato [Fig. 43-45].

Le travi appoggiate, vincolate con una cerniera (appoggio fisso) e un carrello (appoggio semplice), sono caratterizzate da reazioni vincolari che dipendono da tre parametri: in corrispondenza dell'appoggio fisso A , le componenti Y_a normale all'asse della trave e X_a secondo l'asse; mentre, in corrispondenza dell'appoggio scorrevole B , la reazione Y_b normale alla direzione di scorrimento, solitamente parallela all'asse della trave [Fig. 46, (a)]²⁵.

Generalmente, le equazioni di equilibrio fra i carichi e le reazioni sono tre:

$$\Sigma X = 0 \quad \Sigma Y = 0 \quad \Sigma M = 0$$

dove X e Y sono le componenti secondo l'asse della trave e la normale all'asse, ed M i momenti rispetto a un punto qualunque del piano.

Naturalmente, nel caso in cui la trave sia orizzontale [Fig. 46, (b)], X e Y sono le componenti orizzontali e verticali. La reazione dell'appoggio scorrevole B è sempre perpendicolare alla direzione di scorrimento, dunque sempre verticale. Inoltre, se i carichi sono verticali, la prima delle tre equazioni di equilibrio fornisce che la componente orizzontale dell'appoggio fisso è nulla e, di conseguenza, anche la reazione dell'appoggio A è verticale. In questo caso, i parametri incogniti si riducono a due, così come le equazioni, in quanto la prima è utilizzata per dedurre che $X_a = 0$:

$$\Sigma Y = 0 \quad \Sigma M = 0$$

Queste due equazioni di equilibrio contengono entrambe le incognite A e B , da cui si possono ottenere due equazioni contenenti ciascuna una sola incognita. Per evitare di avere una combinazione lineare inefficace delle due equazioni, si procede rinunciando a $\Sigma Y = 0$ e mettendo a sistema le due equazioni dei momenti rispetto ai punti A e B , trovando ogni volta un'incognita:

$$A = \frac{\Sigma P b}{l} \quad B = \frac{\Sigma P a}{l}$$

Se la trave appoggiata è sottoposta a un carico ripartito [Fig. 46, (c)], di cui è noto il carico unitario $q(x)$, le due incognite A e B diventano:

$$A = \frac{1}{l} \int_0^l q(l-x) dx \quad B = \frac{1}{l} \int_0^l qx dx$$

Infine, se invece è noto il baricentro G del diagramma di carico, ossia la risultante Q dei carichi, distante a e b dagli appoggi, si ottengono i seguenti valori per le incognite A e B :

$$A = \frac{Q \cdot b}{l} \quad B = \frac{Q \cdot a}{l}$$

25 Belluzzi O., *Scienza delle costruzioni*, Zanichelli, Bologna 1966.

Le analisi meccaniche condotte, illustrate successivamente, sono volte all'individuazione dei parametri necessari per la definizione delle proprietà di resistenza meccanica del pannello. I grafici ottenuti consentono di determinare l'entità degli spostamenti e delle tensioni osservabili per il modello del pannello studiato, vincolato come previsto e sottoposto all'azione delle sollecitazioni considerate (peso proprio e vento).

In particolare, vengono valutati i seguenti fattori: spostamenti, tanto nel piano del pannello (in senso orizzontale UX e verticale UZ), quanto nel piano ortogonale al pannello (in senso orizzontale UY); tensioni massime degli elementi, da confrontare con le tensioni ammissibili dei materiali presenti nel sistema per evitare il verificarsi di fessurazioni nei cubi geopolimerici (resistenti a compressione) o di snervamenti nei cavi metallici (resistenti a trazione); tensioni di Von Mises.

Da questi dati è possibile valutare l'appropriatezza delle scelte progettuali, con particolare riguardo verso la dimensione del sistema globale di pannellatura, verso il numero e le caratteristiche degli elementi di armatura inseriti all'interno dei conci in pietra, e verso il tipo e il numero di ancoraggi meccanici puntuali previsti, simulati nel modello mediante l'inserimento di vincoli a cerniera in sommità e a carrello alla base.

Questa fase di analisi meccanica costituisce, dunque, un momento essenziale di verifica delle scelte adottate durante la fase progettuale, a cui far seguire la loro validazione o, in alternativa, la modifica delle caratteristiche costituenti eventuali fattori di inefficienza costruttiva e strutturale.

In particolare, l'analisi meccanica del sistema di involucro proposto si basa sullo svolgimento di simulazioni di carico, volte a determinare numericamente l'entità delle deformazioni e degli stati tensionali sviluppati nel modello del pannello di facciata, vincolato esternamente secondo le condizioni al contorno sopra citate [Fig. 42].

Le analisi agli elementi finiti, trattate con il software *Cast3M 2000*, vengono svolte sul modello semplificato dei pannelli di facciata, con dimensioni ridotte rispetto a quelle ipotizzate per i reali pannelli di rivestimento proposti per gli edifici esistenti (con altezza pari a circa 3 m). In particolare, il modello è costituito dall'assemblaggio di n. 67 cubi in materiale geopolimerico (AAM - *Alkali Activated Material*) di lato pari a 0,15 m, a costituire un pannello di superficie pari a 1,80 m² (1,40x1,30 m). Durante la fase di analisi meccanica, il modello del pannello è sottoposto al peso proprio (pari a circa 40 kg) e al carico del vento (pari a 980 Pa), distribuito su tutta la superficie esterna.

Gli spostamenti osservabili dal modello realizzato, composto da conci ("meshT") e da tiranti ("meshD"), risultano coerenti con la direzione delle forze applicate e di ordine di grandezza accettabile, in rapporto alle sollecitazioni considerate. Inoltre, essi risultano di entità esigua (pari a 1/5.000 della luce, in corrispondenza del punto centrale della base del pannello, soggetto al massimo abbassamento rilevato) rispetto alle dimensioni del pannello studiato, in quanto dell'ordine di grandezza di 10^{-5} e 10^{-6} m, dimostrando la resistenza e l'integrità del sistema.

Per quanto riguarda le tensioni, considerando il modello studiato, sollecitato dalle forze applicate [N] e dai carichi distribuiti [Pa], si osservano valori delle tensioni medie [Pa] di entità variabilmente ridotta, comunque sempre nel rispetto delle tensioni ammissibili per i materiali utilizzati.

In particolare, coerentemente con quanto atteso da un materiale resistente a compressione come il geopolimero, le tensioni medie sviluppate nei conci, valutate in corrispondenza della sezione mediana verticale [Fig. 58-63] e dell'involucro esterno dei cubi [Fig. 64-69], risultano sempre notevolmente inferiori alla resistenza media a compressione del materiale AAM, pari a $f_{bm} = 5 \text{ MPa} = 5 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, dimostrando così l'assenza di fessurazioni nei cubi.

La tensione media rilevata nei conci, sia esternamente che internamente, risulta essere sempre negativa, a dimostrazione del fatto che tutti i cubi realizzati nel materiale coibente e massivo sono sottoposti a uno stato tensionale di compressione. Soltanto in corrispondenza dell'estremità superiore dei cavi di ancoraggio si sviluppano delle tensioni massime positive, corrispondenti a uno stato tensionale di trazione. Questo dato risulta coerente con quanto atteso da un sistema costruttivo di questo tipo, basato sulla posa in opera di un pannello prefabbricato appeso e ancorato in corrispondenza del suo estremo superiore, mediante un sistema di cavi interni, connessi alla facciata esistente con un vincolo a cerniera. Infatti, la tensione massima di trazione sviluppata nei cavi, che risulta comunque notevolmente inferiore alla tensione ammissibile dell'acciaio impiegato (pari a circa 900 MPa), si sviluppa proprio in corrispondenza dei punti di ancoraggio sommitale.

Pertanto, si può concludere che il pannello configurato, connesso alla facciata esistente mediante quattro ancoraggi meccanici puntuali disposti ai quattro angoli, presenta buone capacità di integrità, resistenza e stabilità meccanica in rapporto all'utilizzo proposto.

Di seguito, si riportano i valori delle tensioni determinate attraverso le analisi meccaniche svolte con *Cast3M 2000*, sul modello geometrico successivamente rappresentato:

SEZIONE VERTICALE ESAGONALE				INVOLUCRO ESTERNO CUBI			
TENSIONI	σ_{media} [Pa]	σ_{max}^+ [Pa]	σ_{max}^- [Pa]	TENSIONI	σ_{media} [Pa]	σ_{max}^+ [Pa]	σ_{max}^- [Pa]
σ_{11}	-203	$+3,96 \cdot 10^3$	$-9,35 \cdot 10^3$	σ_{11}	-71	$+1,33 \cdot 10^3$	$-7,96 \cdot 10^3$
σ_{22}	-92	$+2,07 \cdot 10^3$	$-1,03 \cdot 10^4$	σ_{22}	-14	$+1,12 \cdot 10^3$	$-5,81 \cdot 10^3$
σ_{33}	-1.130	$+8,50 \cdot 10^3$	$-3,26 \cdot 10^4$	σ_{33}	-254	$+2,99 \cdot 10^3$	$-2,43 \cdot 10^4$
σ_{12}	-42	$+1,64 \cdot 10^3$	$-1,92 \cdot 10^3$	σ_{12}	-13,2	$+5,39 \cdot 10^2$	$-3,97 \cdot 10^2$
σ_{13}	-175	$+7,12 \cdot 10^3$	$-9,15 \cdot 10^3$	σ_{13}	-28	$+2,38 \cdot 10^3$	$-2,48 \cdot 10^3$
σ_{23}	-260	$+8,60 \cdot 10^3$	$-8,06 \cdot 10^3$	σ_{23}	-62	$+2,11 \cdot 10^3$	$-1,80 \cdot 10^3$

Per quanto riguarda le proprietà termiche, isolanti e massive, del pannello di facciata proposto, costituito da cubi autobloccanti di lato 0,15 m, in materiale geopolimerico AAM, caratterizzato da un coefficiente di conducibilità termica $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, si dimostra che un pannello monostrato consente di migliorare notevolmente le prestazioni energetiche dell'edificio esistente, grazie a uno spessore medio di 13 cm. Questo spessore, infatti, risulta essere sufficiente per conseguire l'effettivo efficientamento energetico di una parete perimetrale dalle proprietà termiche originarie scadenti, grazie al raggiungimento di buoni livelli di trasmittanza stazionaria nel rispetto del *D.lgs 29 dicembre 2006, n. 311*, che impone una U limite di $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Si prevede, infine, la possibilità di riempire l'intercapedine interposta fra lo strato isolante e la facciata esistente mediante un ulteriore strato isolante costituito da aria o da altro materiale coibente aggiuntivo, sotto forma di particelle o fiocchi sfusi (quali vermiculite in argilla espansa o perlite). Tale intervento può contribuire ad ottenere un ulteriore efficientamento energetico del fabbricato esistente mediante l'applicazione di una seconda pelle di involucro altamente performante.

ANALISI MECCANICA CON FEMDE (METODO AGLI ELEMENTI FINITI CON ELEMENTI DISCONTINUI) CON SOFTWARE *Cast3M 2000*

Successivamente alla fase di creazione del modello geometrico del pannello di facciata mediante il software parametrico-variazionale *Wolfram Mathematica*, vengono importate le coordinate dei vertici all'interno del software *Cast3M 2000* per lo svolgimento dell'analisi meccanica con il metodo numerico di approssimazione FEMDE.

Si tratta di un codice di calcolo per l'analisi strutturale basato sul metodo degli elementi finiti, sviluppato dal DMT - *Département Mécanique et Technologie*, del CEA - *Commissariat français à l'Energie Atomique*. L'elaborazione di questo software rientra all'interno di un'ampia attività di ricerca nel campo della meccanica, atta a fornire uno strumento di elevata affidabilità di supporto alla concezione, al dimensionamento e all'analisi delle strutture e dei componenti, inizialmente nel campo nucleare e industriale classico.

Gli studi condotti sul comportamento delle strutture di elevate dimensioni, caratterizzate da una particolare complessità geometrica e costituite da blocchi, eventualmente connessi con giunti di malta, prevedono l'impiego del Metodo degli Elementi Finiti (FEM), il quale ipotizza l'omogeneità del materiale.

I due metodi possibili per condurre gli studi secondo tale sistema sono il Metodo degli Elementi Finiti con elementi discontinui (FEMDE), e il Metodo degli Elementi Discreti (DEM). Usando il FEMDE, i blocchi di forma cubica che costituiscono il sistema costruttivo (in questo caso, autobloccante) vengono rappresentati usando elementi continui convenzionali e modelli, elastici o non lineari.

Il FEM consente di risolvere il problema della determinazione dello stato di sforzo e di deformazione di elementi per i quali, sotto particolari condizioni di carico, non è possibile reperire o ricavare la soluzione analitica, qualora le sue condizioni al contorno e le sue forme geometriche risultino eccessivamente complesse. Per tali ragioni, si procede alla discretizzazione del continuo, dotato di infiniti gradi di libertà, con un insieme di elementi di dimensioni finite, connessi tra loro da punti predefiniti, detti nodi: il problema statico viene così ricondotto ad un sistema di equazioni algebriche con un numero finito di incognite.

In quest'ottica, *Cast3M 2000* non soltanto consente di condurre il processo di calcolo propriamente detto, bensì anche la costruzione del modello (pre-processo) e delle funzioni di trattamento dei risultati (post-trattamento). Il nucleo di questo software è costituito dalla congiunzione di tre programmi sviluppati dal CEA/DMT: uno di creazione del supporto geometrico, uno di calcolo e uno programma di visualizzazione dei risultati. Sono stati sviluppati poi, in seguito al verificarsi di molteplici problemi, due programmi di calcolo distinti che, all'occorrenza, sono capaci di comunicare tra loro.

Le potenzialità di *Cast3M 2000*, nelle quali risiedono le ragioni che hanno portato alla scelta di tale metodo per condurre le analisi strutturali sul sistema costruttivo di facciata, consistono nella capacità di integrare tutti i processi utilizzati in passato, consentendo la possibilità di accogliere anche quelli che serviranno nel futuro per trattare nuove problematiche in ambito strutturale. Tramite la modifica manuale dei parametri e delle funzioni inserite secondo le necessità dell'utente, infatti, questo programma permette di adattare i calcoli a molteplici problematiche, potendo definire, passo per passo, la sequenza più adatta fra i processi elementari disponibili all'interno della libreria di operatori e direttive di *Cast3M 2000*.

Tale software consente di creare una procedura automatica che, a partire da un numero minimo di parametri geometrici inseriti preliminarmente dall'utente, sia in grado di realizzare un modello virtuale del sistema costruttivo oggetto di studio. Inoltre, grazie all'inserimento delle informazioni necessarie alla definizione del comportamento fisico di cui è costituito il sistema e alla definizione dei carichi applicati, è possibile ottenere l'analisi meccanica della struttura. In un'ottica di parametrizzazione del processo progettuale, uno degli aspetti principalmente considerati durante le analisi condotte riguarda proprio la volontà di conferire la massima genericità alle informazioni di input fornite al programma, al fine di poter applicare la procedura a una vasta gamma di casi.

Non è questa la sede per analizzare approfonditamente il linguaggio di programmazione utilizzato da *Cast3M 2000* che, per la sua natura alquanto complessa e articolata, necessiterebbe di tempistiche di analisi focalizzate interamente su questo asse di ricerca. Ci basti ora considerare, in linea più generale, i principi alla base del software utilizzato, al fine di comprenderne lo specifico utilizzo all'interno dell'analisi strutturale di uno dei due sistemi costruttivi di facciata proposti dal progetto di ricerca.

Il metodo agli elementi finiti applicato alle strutture assume una funzione di spostamento all'interno del singolo elemento, definendo cioè le componenti di spostamento del generico punto come una funzione degli spostamenti dei nodi, ipotizzata nota: assumendo come nuove incognite gli spostamenti dei punti nodali, si passa dal dominio continuo al dominio discreto. Una volta noti gli spostamenti nodali, è immediato il passaggio alle deformazioni, così come quello ulteriore al tensore degli sforzi, mediante la matrice di legame sforzi-deformazioni.

Cast3M consente di creare una procedura automatica che, a partire da un numero minimo di parametri geometrici inseriti preliminarmente dall'utente, sia in grado di realizzare un modello virtuale del sistema costruttivo oggetto di studio. Inoltre, grazie all'inserimento delle proprietà fisiche del materiale costituente il sistema e alla definizione dei carichi applicati, è possibile ottenere l'analisi meccanica della struttura.

L'analisi generale effettuata con il supporto del metodo degli elementi finiti si sviluppa in tre fasi principali, ciascuna delle quali può essere scomposta in una serie di processi elementari: la scelta della geometria e della discretizzazione (intesa come la suddivisione in elementi finiti della

struttura data) per la preparazione del modello di calcolo; lo svolgimento del calcolo non lineare per la risoluzione del problema discreto; il post-trattamento dei risultati ottenuti.

FASE 1. PREPARAZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

Durante la prima fase di preparazione del modello di calcolo, il quale rappresenta l'insieme di dati che l'utente deve fornire per descrivere le caratteristiche complete del sistema da analizzare, occorre prima di tutto definire il tipo di elementi su cui si intende operare. Nel caso del modello oggetto di studio, costituito da un numero di conci cubici pari a sessantasette, si è scelto di considerare elementi solidi, discretizzati come tetraedri a quattro nodi (indicati con la dicitura "TET4"), in ambiente tridimensionale.

Tramite la direttiva "OPTI", grazie alla quale si specifica il tipo di calcolo, in relazione al tipo di discretizzazione, si sono quindi stabiliti i seguenti parametri generali: le dimensioni dello spazio ("DIME"), il modo di calcolo tridimensionale ("TRID"), l'opzione di far apparire o meno i dati in uscita ("ECHO"), e gli elementi finiti da fabbricare ("ELEM"). Pertanto, la scrittura digitata all'interno del linguaggio di programmazione risulta:

OPTI ECHO 1 DIME 3 ELEM TET4 MODE TRID;

dove ";" finale indica il termine dell'istruzione elementare.

La successiva fase di realizzazione della geometria, ovvero delle facce e dei volumi di ogni singolo concio costituente il sistema costruttivo autobloccante, si serve di procedure standard che, tramite l'inserimento dei dati di input iniziali, riescono a fornire la generazione di un modello virtuale corrispondente alla struttura oggetto di studio. La forma discreta del dominio che si vuole studiare è rappresentata dalla geometria, composta da oggetti di tipo "MAILLAGE". La prima fase dell'analisi si occupa proprio della realizzazione della geometria oggetto di studio, attraverso la rappresentazione di ogni elemento, ossia di ogni concio di forma cubica, attraverso la definizione dei suoi nodi "POINT", definiti a loro volta dalle coordinate nello spazio, in questo caso tridimensionale. Successivamente si procede alla realizzazione degli spigoli "DROIT", delle facce "SURF" o "DALL", e infine del solido compreso all'interno dell'involucro costituito dalle facce "VOLU": si tratta di operatori che sono già presenti di default all'interno del programma *Cast3M*. Per rendere più semplice l'approccio al calcolo, si utilizzano alcuni parametri che vengono definiti arbitrariamente dall'utente all'inizio dell'applicazione, dai quali dipendono direttamente i dati restanti utilizzati dal programma.

Durante la fase di tracciamento del disegno della geometria, al fine di creare delle *mesh* compatibili tra loro, si ricorre all'operatore "CBLO", che esegue il ciclo un numero di volte pari

al numero dei cubi (variabile “NDIM”) costituenti la struttura e grazie al quale viene fornita una tabella contenente concetti compatibili tra loro, a partire da una tabella di concetti non compatibili.

Una volta acquisiti gli N vertici (con $N=7 \div 11$ in funzione dell'elemento considerato) che definiscono il volume esterno di ogni concetto, questo operatore consente di affidare automaticamente al programma il calcolo degli altri vertici, garantendone una discretizzazione degli elementi finiti compatibile tra le facce adiacenti. Come anticipato precedentemente, la definizione dei volumi di ogni singolo concetto costituente il sistema autobloccante si basa sui dati relativi alle coordinate dei vertici acquisiti dal software *Mathematica*, dedicando molta attenzione all'importazione dei dati secondo il medesimo ordine.

Naturalmente, tutte le procedure utilizzate sono caratterizzate dalla definizione preliminare del numero dei cubi autobloccanti costituenti il pannello oggetto di analisi, il cui valore viene inserito all'interno di procedure interne create manualmente (“BOUCLE”): tale operatore consente di registrare i dati all'interno di tabelle nominate dall'utente, a livello di vertici, spigoli, facce e volumi, fornendo una gestione ordinata dei dati relativi ad ogni cubo.

In particolare, l'acquisizione delle coordinate dei vertici dall'esterno avviene mediante il richiamo di un file in formato .txt nel caso di utilizzo del software su sistema operativo Windows (o .dgi per Macintosh), contenente le coordinate ricercate, ordinate secondo l'ordine convenzionale (“CHaine 'nome file.txt' ;”). Successivamente, procedendo all'assemblaggio delle parti scomposte, mediante l'esecuzione di cicli “BOUCLE”, seguendo la stessa numerazione di riferimento impiegata per il calcolo con *Mathematica*, si giunge al compimento della realizzazione della *mesh* costituente i cubi (denominata dall'utente “meshT”) [Fig. 47].

Procedendo nella realizzazione del modello di calcolo per l'analisi del comportamento del sistema costruttivo proposto, si procede all'inserimento dei cinque cavi di armatura inseriti all'interno delle cavità predisposte verticalmente all'interno di colonne alterne di cubi, passanti per il loro baricentro. Analogamente a quanto eseguito per i concetti cubici, anche per i cavi vengono importate le coordinate da *Mathematica* e, una volta tracciata la geometria, si realizza la *mesh* corrispondente a questi elementi di ancoraggio del sistema (denominata “meshD”) [Fig. 48].

Per quanto riguarda la fase seguente di realizzazione dei giunti tra i concetti, costituiti da una *mesh* denominata “mjjoint0”, viene utilizzato l'operatore “GENJ”, il quale garantisce automaticamente il corretto orientamento di ogni singolo giunto, consentendo di collegare tutti gli elementi che si trovano a una distanza reciproca definita, senza necessitare della denominazione delle facce da collegare. Infatti, richiamando semplicemente il nome dell'intera geometria (“meshT”), gli elementi vengono collegati automaticamente, sopperendo alle problematiche relative alla densità degli elementi finiti. Per garantire l'ipotesi di contatto tra due concetti vicini e il giunto intermedio, durante la fase di modellazione occorre assicurarsi che i nodi che definiscono i concetti e quelli che definiscono i giunti siano identicamente finiti [Fig. 49].

Durante la fase successiva di definizione del modello di comportamento del materiale, si procede all'inserimento degli operatori che indicano la legge di comportamento del materiale e la formulazione degli elementi finiti da associare all'oggetto geometrico di analisi. Inoltre, occorre specificare l'elemento finito che si vuole utilizzare, al fine di garantirne la compatibilità, tenendo conto di quanto indicato nella direttiva "OPTI", di cui si è trattato precedentemente.

Nel caso del pannello costituito da cubi autobloccanti, si sceglie di lavorare nel campo di un comportamento meccanico, considerando i conci ("meshT") e i giunti ("mjjoint0") definiti da un modello di materiale elastico e isotropo, e i cavi di armatura Ø4 ("meshD") definiti da un modello di materiale elastico di tipo "BARR", assimilabile a quello di una barra di acciaio caratterizzata da una determinata sezione retta e da precisi valori del momento di inerzia:

MOD1 = MODEL meshT MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE;
 MOD2 = MODEL mjjoint0 MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE;
 MOD3 = MODEL meshD MECANIQUE ELASTIQUE BARR;

Successivamente, sempre all'interno della fase di definizione del modello di calcolo, occorre inserire le caratteristiche del materiale degli elementi costituenti la struttura. Secondo il tipo di calcolo e di elementi finiti utilizzati, occorre definire tanto le proprietà del materiale, quanto le caratteristiche geometriche. Per definire le proprietà dei materiali del modello si utilizza l'operatore "MATE", mentre per definire le caratteristiche geometriche l'operatore "CARA". Per attribuire tali dati occorre sempre fare riferimento al tipo di elemento finito scelto, al tipo di calcolo e al tipo di modello di comportamento. Ogni modello di comportamento, infatti, necessita della specificazione dei parametri impiegati per svolgere i calcoli, così come ogni calcolo necessita della definizione di parametri precisi: il modulo di Young "YOUN", il coefficiente di Poisson "NU", la densità "RHO" e lo spessore "EPAI".

Per i conci cubici di lato 0,15 m, al fine di simulare il comportamento di un pannello di facciata realizzato in cubi di malta geopolimerica AAM, ci si riferisce ai valori di modulo di Young pari a $257 \cdot 10^6$ Pa, coefficiente di Poisson pari a 0,25 e densità pari a 200 kg/m^3 , richiamati dalla seguente dicitura:

MAT1 = MATER MOD1 YOUN YOUNP NU NUP RHO RHOP;

Per i giunti, invece, ci si riferisce a valori di densità pari a 2.500 kg/m^3 , coefficiente di Poisson nullo, coesione nulla e angolo di attrito pari a 45° , richiamati dalla seguente scrittura:

MAT2 = MATER MOD2 KN KN1 KS KS1 EF EF1 ECN ECN1

COHE COHE1 FRIC FRIC1 RHO RHOP2 ;

dove i parametri aggiuntivi da definire sono la rigidità normale “KN” e la rigidità tangenziale “KS”, la coesione “COHE”, e l’angolo di attrito “FRIC”.

Anche per quanto riguarda i cavi metallici, vengono inserite le caratteristiche del materiale secondo valori presenti in letteratura, attribuendo loro un modulo di Young pari a $2,10 \cdot 10^{11}$ Pa, un coefficiente di Poisson pari a 0,25, una densità pari a 7850 kg/m^3 e i valori di inerzia:

MAT3 = MATER MOD3 YOUN YOUNA NU NUA RHO RHOA ;

CAR3 = CARA MOD3 SECT sU;

MAT3 = MAT3 ET CAR3 ;

MECGEOB = MAT3 ET CAR3;

dove per i valori relativi all’inerzia è stato considerato un cavo Ø4, con momento di inerzia rispetto all’asse locale y e z pari a $3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$.

Definito il modello matematico grazie all’importazione delle coordinate da *Mathematica*, si procede alla definizione dei vincoli esterni: nel caso specifico del pannello di facciata studiato, le estremità inferiori dei cavi possono ruotare e subire piccole traslazioni nel piano del pannello, mentre le estremità superiori sono vincolate ammettendo esclusivamente la rotazione. Di conseguenza, i concetti d’angolo del pannello sono vincolati mediante un vincolo semplice che consente la traslazione del sistema soltanto lungo l’asse verticale del pannello z. [Fig. 47-49]

Nella fase seguente, si procede quindi con la definizione delle condizioni al contorno e delle condizioni di carico. Le condizioni ai limiti sono trattate da *Cast3M* mediante il metodo dei moltiplicatori di Lagrange, scritte nella forma: $\bar{\bar{C}} \times \bar{u} = \bar{q}$. Esse sono prese in considerazione all’interno di un sistema di equazioni lineari di equilibrio:

$$\begin{aligned} \bar{\bar{K}} \times \bar{u} + \bar{\bar{C}}^T \times \bar{\lambda} &= \bar{F} \\ \bar{\bar{C}} \times \bar{u} &= \bar{q} \end{aligned}$$

Nel caso del pannello costituito da cubi autobloccanti oggetto di studio, si considerano tutti i cavi vincolati all’estremità superiore mediante un vincolo a cerniera, mentre soltanto i due cavi esterni vincolati all’estremità superiore mediante un vincolo semplice a carrello, per consentire la traslazione verticale (lungo l’asse z) esclusivamente nel piano del pannello, a simulazione delle deformazioni che esso potrebbe subire durante la fase di esercizio [Fig. 50]. Questa condizione al contorno viene registrata all’interno delle variabili “enca1” ed “enca2”, definite dall’utente.

Per quanto riguarda i cubi, invece, essi sono vincolati esclusivamente da vincoli semplici a

carrello che consentono la traslazione soltanto lungo l'asse z, rappresentati da quattro connettori meccanici puntuali, disposti in corrispondenza dei quattro angoli del pannello, inseriti per la ripresa degli sforzi orizzontali. Questa ulteriore condizione di vincolo viene salvata all'interno di una variabile dal nome "CLC".

Per tradurre queste condizioni al contorno nel linguaggio di programmazione utilizzato da *Cast3M*, si utilizza l'operatore "BLOQ DEPLA" per rappresentare il vincolo doppio a cerniera e l'operatore "BLOQ UX UY" per rappresentare il vincolo semplice a carrello che consenta esclusivamente lo scorrimento del sistema nel piano del pannello. Grazie all'operatore "BLOQ", infatti, è possibile costruire la rigidezza $\bar{\bar{C}}$ da aggiungere alla rigidezza $\bar{\bar{K}}$ del sistema riportato sopra.

- * Blocco dell'estremità superiore (bloNA) dei 5 cavi e dell'estremità inferiore (bloNB) dei 2 cavi esterni di meshD

enca1 = BLOQ DEPLA (blo1A et blo2A et blo3A et blo4A et blo5A) ;

enca2 = BLOQ UX UY (blo1B et blo5B) ;

- * Blocco dei due conci cubici d'angolo superiori (supAPP1) e inferiori (supAPP2) di meshT

STEP2 = TABLE;

STEP2 . 1 = BLOQ UX UY supAPP1 ;

STEP2 . 2 = BLOQ UX UY supAPP2 ;

CLC = (STEP2 . 1 ET STEP2 . 2) ;

CLCTOT = enca1 ET enca2 et CLC;

Per quanto riguarda le condizioni di vincolo interne, invece, viene impiegato l'operatore "RELA GLISSANT", il quale permette di costruire la rigidezza associata all'ancoraggio degli elementi "MAILLAGE" dei cavi ("meshD") su quelli costituenti i conci cubici ("meshT"), dentro ai quali sono inclusi. Mediante questo operatore, tutti i punti di "meshD" possono scivolare lungo la direzione dell'asse z dell'elemento "meshT" che lo contiene, secondo una combinazione lineare degli spostamenti dei nodi dell'elemento meshT, lungo la direzione perpendicolare:

CLD = RELA meshD GLISSANT meshT ;

Una volta imposte le condizioni ai limiti del modello di calcolo, si procede alla definizione delle condizioni di carico, mediante la creazione di un campo per punti corrispondente al secondo membro dell'equazione $\bar{\bar{K}} \times \bar{u} = \bar{F}$. In un primo momento si suppone la presenza del solo peso proprio: data la mancanza di operatori specifici di definizione di alcuni tipi di carico, come il peso proprio, si ricorre alla costruzione manuale di una procedura idonea. Infatti, una volta costruite

le matrici di massa ("MASS"), da moltiplicare poi per la forza di accelerazione "ACCG", per il calcolo del peso proprio si considera di applicare su tutti gli oggetti ("TUTTO") un campo di punti "CHPO", creato manualmente dall'operatore ("MANU"), avente una sola componente diretta (asse z), di valore -9.8 m/s^2 , di natura diffusa "NATU DIFF":

```
TUTTO = meshT ET mjoint0 ET meshD;
MODTOT = MOD1 ET MOD2 ET MOD3;
MATTOT = MAT1 ET MAT2 ET MECGEOB;
```

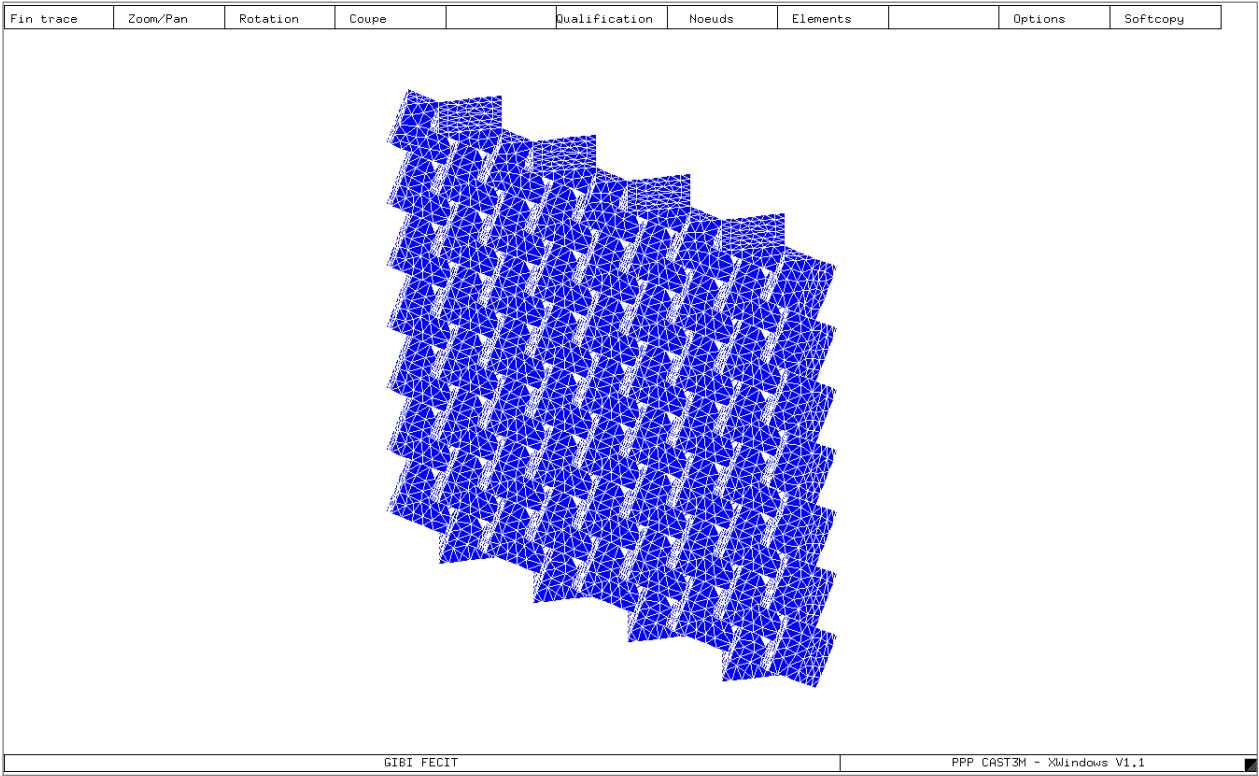
```
M1 = MASS MODTOT MATTOT;
ACCG = MANU CHPO TUTTO 1 UZ -9.8 NATU DIFF;
FORZA = M1*ACCG;
```

Successivamente, si considera un ulteriore carico costituito dalla forza del vento, distribuito sulla superficie esterna del pannello ("MODSUP"), mediante l'utilizzo dell'operatore "COQU", che consente di applicare una pressione normale al piano del pannello, quale quella del vento, a una superficie assimilabile a una lastra sottile rappresentata dal modello meccanico elastico e isotropo di tipo "DKT", secondo l'ipotesi di Kirchhoff:

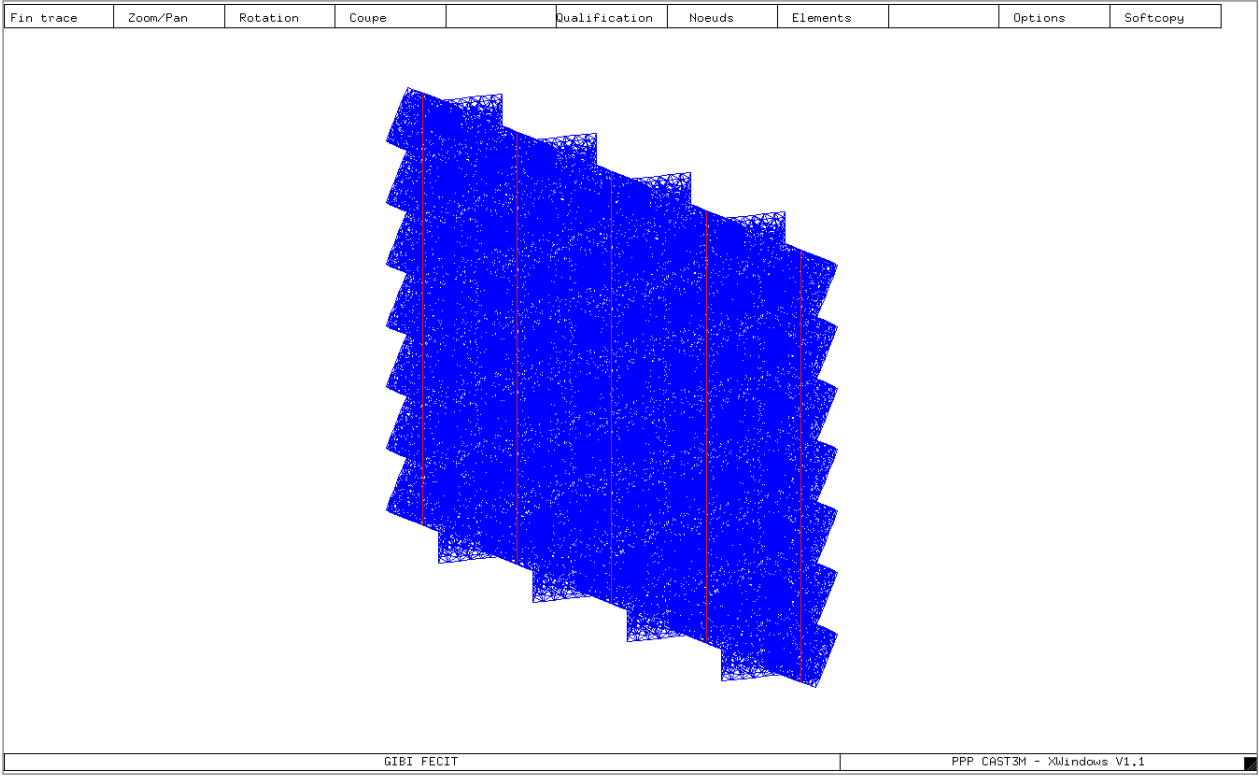
```
MODSUP = MODEL supcar MECANIQUE ELASTIQUE ISOTROPE dkt ;
FORZA2= PRESS COQU MODSUP vento NORM ;
```

Durante la fase finale della preparazione del modello di calcolo, si effettua il calcolo non lineare ("PASAPAS"), applicando i carichi sopracitati all'intero sistema, costituito da conci, giunti e cavi. Necessitando della definizione della precisa evoluzione temporale di applicazione del carico totale, si forniscono ulteriori informazioni al fine di definire il comportamento del carico nel tempo, servendosi di due liste di numeri reali ("PROG"), la prima delle quali "LIS1" indica l'intervallo di tempo di riferimento e gli istanti in cui viene effettuato il carico, mentre la seconda "LIS2" indica il valore della forza negli istanti di tempo. Successivamente, le due liste di valori sono riportate rispettivamente lungo l'asse delle ascisse e delle ordinate di un diagramma cartesiano ("EVOL MANU"), creando così infine un carico definito nel tempo e nello spazio ("CHAR MECA"):

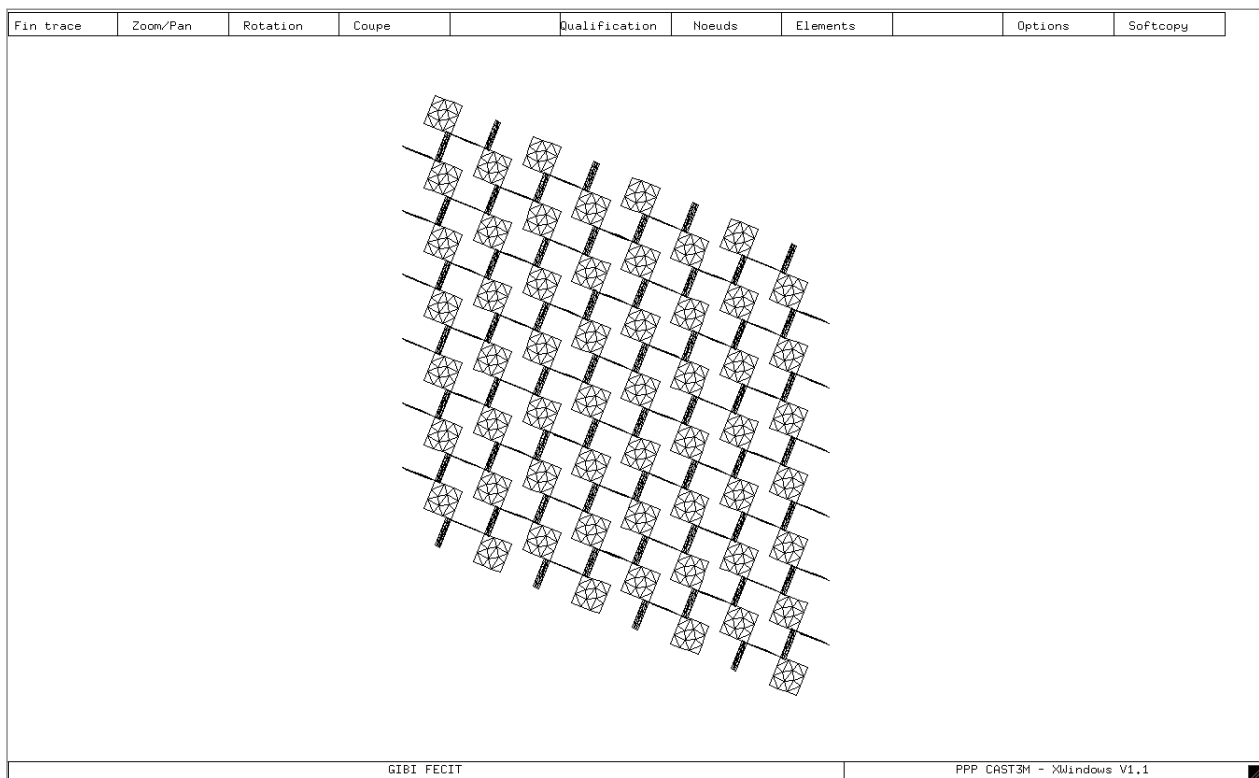
```
LIS1 = PROG 0. PAS 1. 12 ;
LIS2 = PROG 0. 0.25 0.5 0.75
1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. ;
```



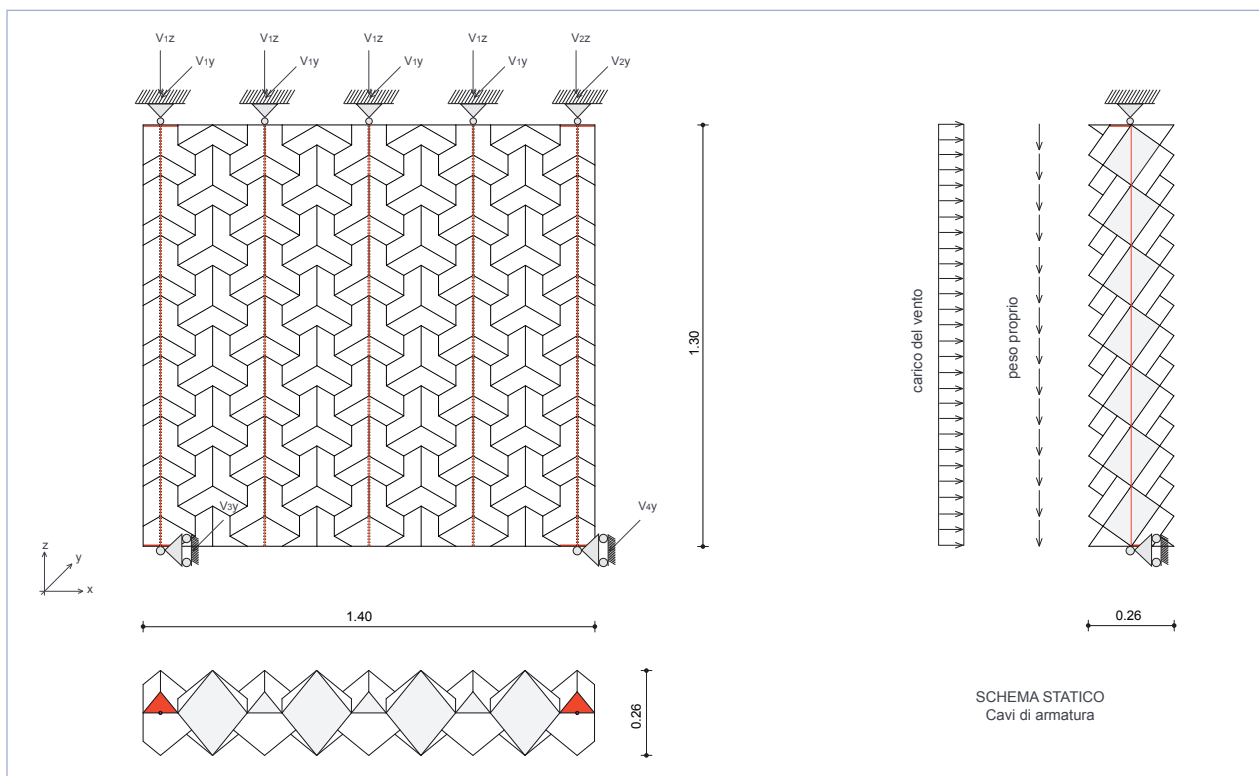
[Fig. 47] Mesh dei conci del modello geometrico “meshT” (stampa a video).



[Fig. 48] In rosso, mesh dei cavi di armatura verticali “meshD” (stampa a video).



[Fig. 49] Mesh dei giunti del modello geometrico “mjjoint0” (stampa a video).



[Fig. 50] Sistema di vincoli esterni in fase di esercizio: pannello armato con 5 cavi di ancoraggio alla facciata esistente

Definiti tutti i parametri necessari per impostare l'analisi, ossia le caratteristiche geometriche del modello, le caratteristiche meccaniche dei materiali, le condizioni al contorno e le condizioni di carico, si procede al calcolo non lineare e al post-trattamento dei risultati, espresso sotto forma di grafici richiesti dall'utente.

FASE 2. RISOLUZIONE DEL CALCOLO

La fase successiva prevede la risoluzione del calcolo. Nel caso dell'analisi del sistema costruttivo studiato si è scelto di utilizzare un calcolo dinamico non lineare, eseguito automaticamente dal programma, mediante l'operatore "PASAPAS".

Al fine di garantire la corretta esecuzione del calcolo, occorre disporre i dati in ingresso in una tabella comprendente i segmenti dati: il modello "TAB3.MODELE", le caratteristiche geometriche del materiale "TAB3.CARACTERISTIQUES", le condizioni al contorno "TAB3.BLOCAGES_MECANIQUES", il carico totale definito nel tempo e nello spazio "TAB3.CHARGEMENT", i tempi in cui si vuole effettuare il salvataggio dei dati "TAB3.TEMPS_SAUVES" e i tempi in cui si vuole effettuare il calcolo "TAB3.TEMPS_CALCULES", nell'ipotesi di grandi spostamenti ("TAB3.GRAND_DEPLACEMENTS = VRAI"), secondo una precisione definita dall'utente ("TAB3.PRECISION"). Di seguito si riporta lo script relativo a questi parametri:

```
TAB3 = TABLE ;  
TAB3.MODELE = MODTOT ;  
TAB3.CARACTERISTIQUES = MATTOT ET CARTOT;  
TAB3.BLOCAGES_MECANIQUES = CLTOT ;  
TAB3.CHARGEMENT = CHATOT ;  
TAB3.TEMPS_SAUVES = TSAUV ;  
TAB3.TEMPS_CALCULES = TSAUV;  
TAB3.GRAND_DEPLACEMENTS = VRAI ;  
TAB3.PRECISION = 2E-04;  
PASAPAS TAB3 ;
```

FASE 3. POST-TRATTAMENTO DEI RISULTATI

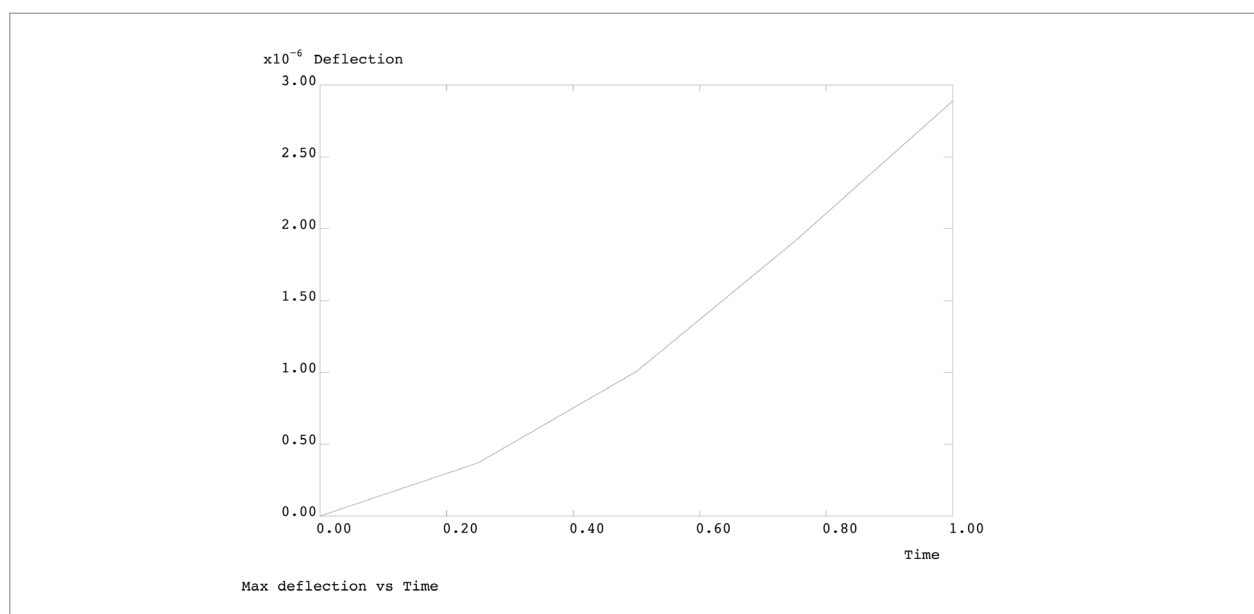
La terza fase riguarda il trattamento dei risultati ottenuti dall'analisi effettuata, grazie all'elaborazione dei quali è possibile svolgere il calcolo delle grandezze derivate ricercate, così come la visualizzazione dei valori richiesti dall'utente, in vista di una migliore interpretazione. Nel caso presentato di calcolo non lineare, oltre alla possibilità di salvare i dati ottenuti all'interno di tabelle,

al fine di riutilizzarli in un calcolo successivo, esistono due tipologie di operatori: quelli riservati al post-trattamento dei dati e quelli dedicati alla rappresentazione grafica.

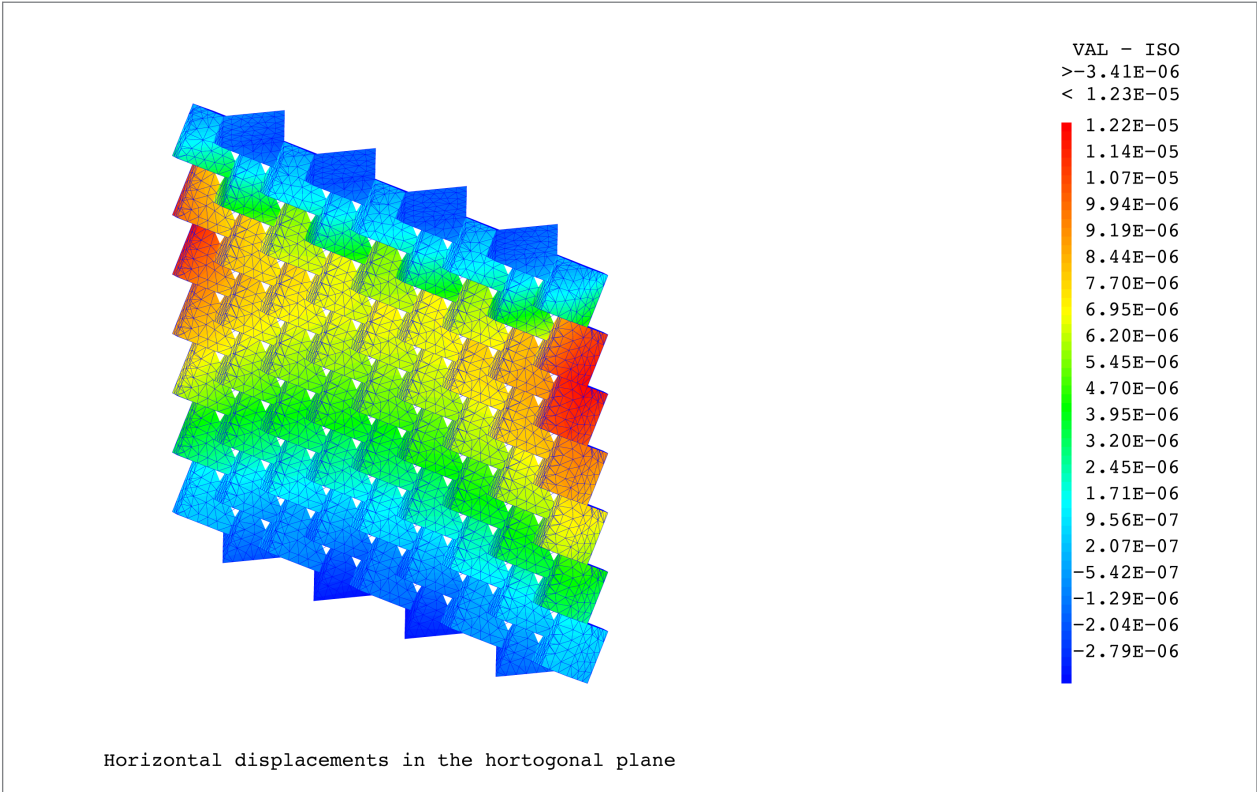
In particolare, per quanto riguarda gli operatori di post-trattamento, durante l'analisi del sistema costruttivo del pannello di facciata viene utilizzato l'operatore "EXTR" che consente di manipolare i campi ottenuti, estraendo il valore numerico di una componente del campo in un punto preciso. Ad esempio, viene valutato lo spostamento del punto baricentrico del cubo centrale del pannello (punto "pn") nella direzione ortogonale al pannello (UY) e nel piano del pannello (UZ):

```
defor = PECHE TAB3 DEPLACEMENTS ;
defy = EXCO defor UY;
TITRE 'Displacements in the hortogonal plane';
defz = EXCO defor UZ ;
TITRE 'Displacements in the plane of the panel';
```

Nel caso in esame, durante il calcolo PASAPAS vengono elaborati e disegnati i seguenti grafici relativi, distintamente, agli elementi cubici (superfici esterne dei conci e sezione mediana esagonale) e ai cavi di ancoraggio: diagramma cartesiano rappresentante la curva tempo-freccia "Max deflection vs time" [Fig. 51]; grafico degli spostamenti massimi nella direzione ortogonale al piano del pannello e spostamenti massimi orizzontali e verticali nel piano stesso del pannello [Fig. 52-57]; grafici riguardanti le tensioni normali e tangenziali (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz}) per gli elementi cubici tridimensionali [Fig. 58-69]; grafici relativi alle tensioni di Von Mises [Fig. 70].



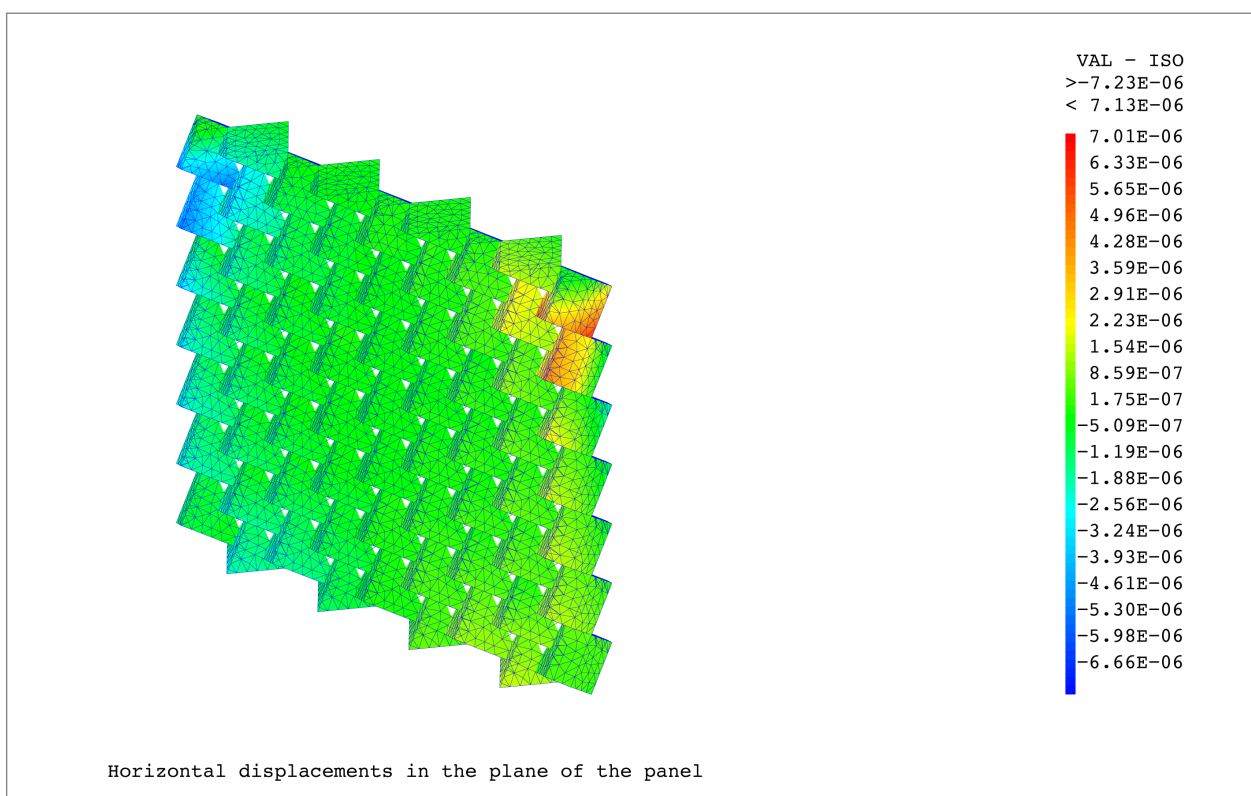
[Fig. 51] Grafico degli spostamenti massimi [m] nel tempo [s] per il carico considerato applicato al modello geometrico.



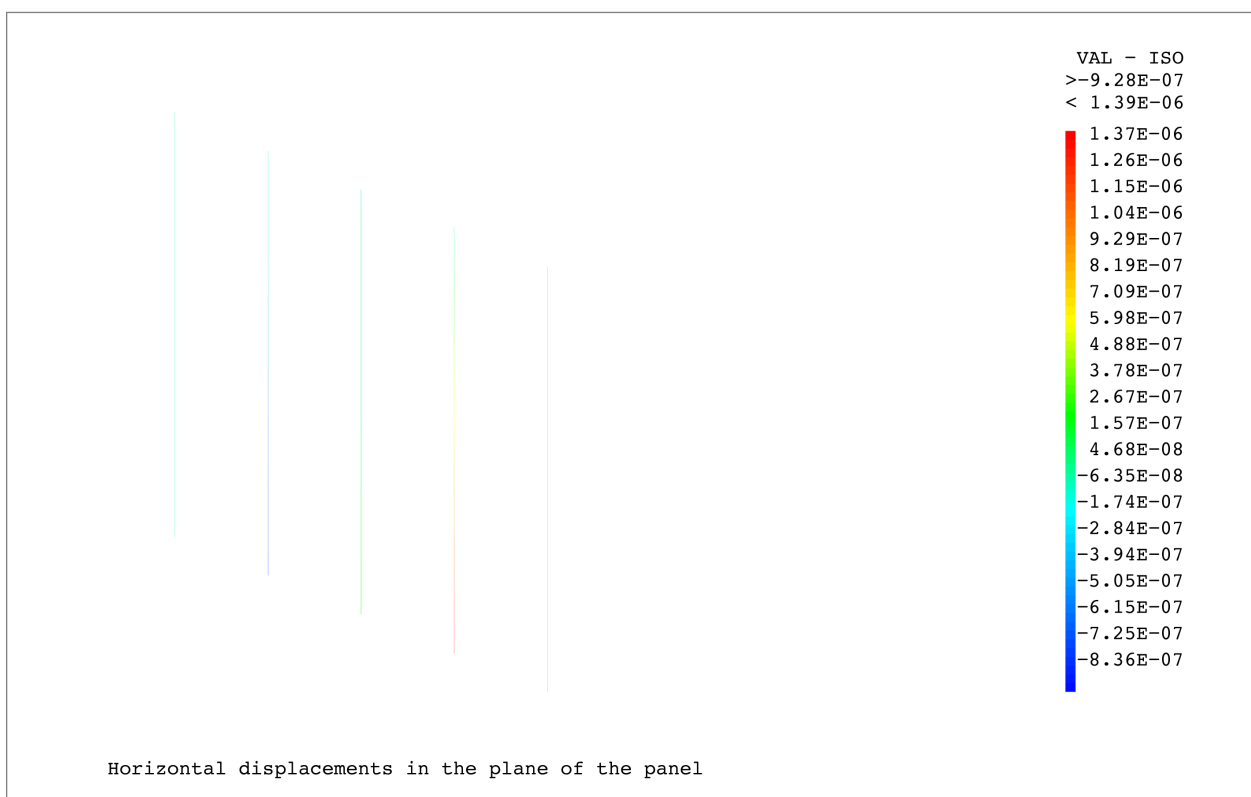
[Fig. 52] Grafico degli spostamenti orizzontali dei cubi nel piano ortogonale al pannello XY [m].



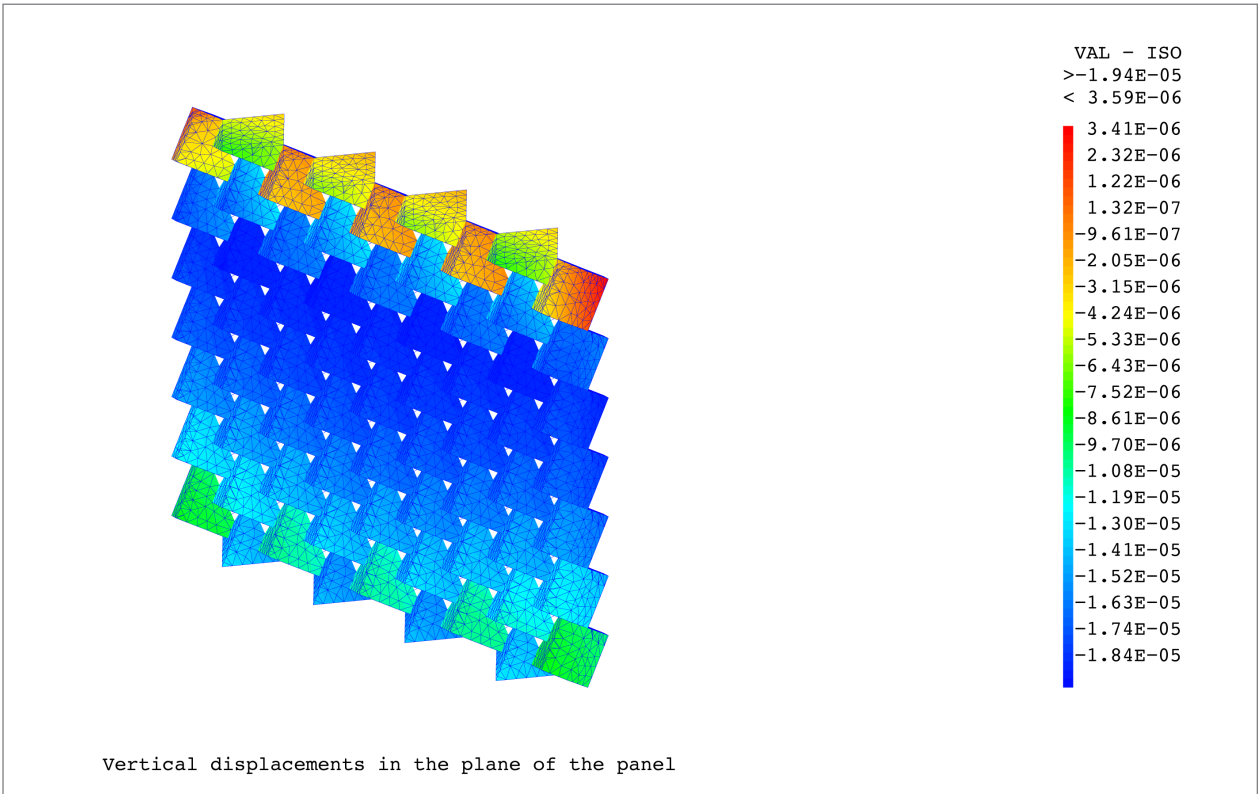
[Fig. 53] Grafico degli spostamenti orizzontali dei cavi nel piano ortogonale al pannello XY [m].



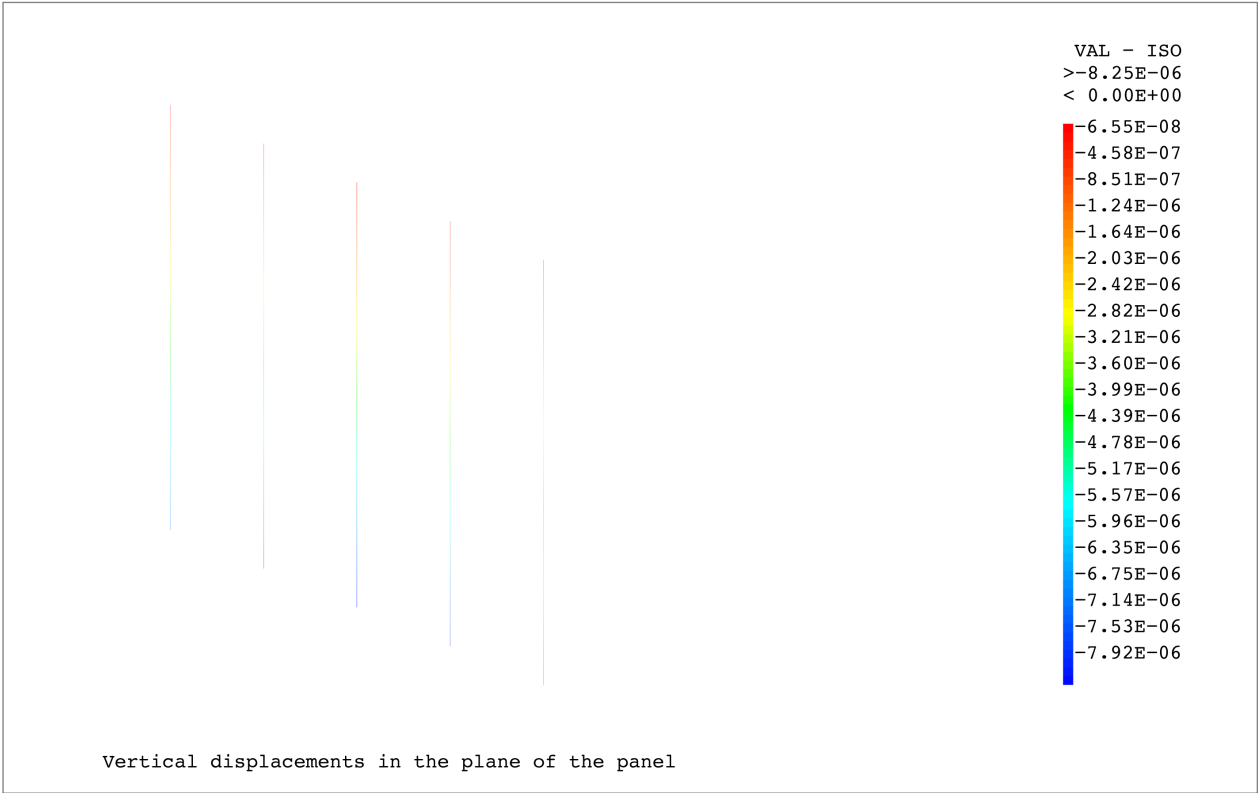
[Fig. 54] Grafico degli spostamenti orizzontali dei cubi nel piano del pannello XZ [m].



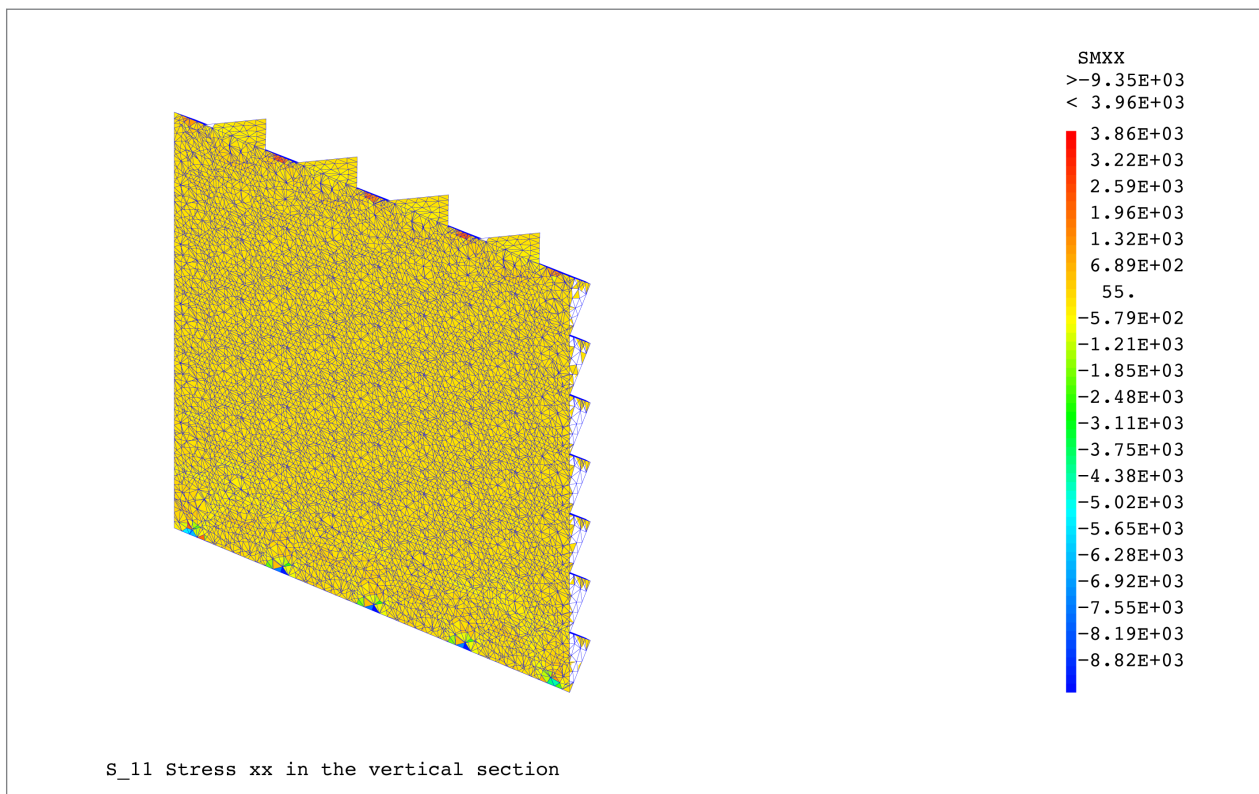
[Fig. 55] Grafico degli spostamenti orizzontali dei cavi nel piano del pannello XZ [m].



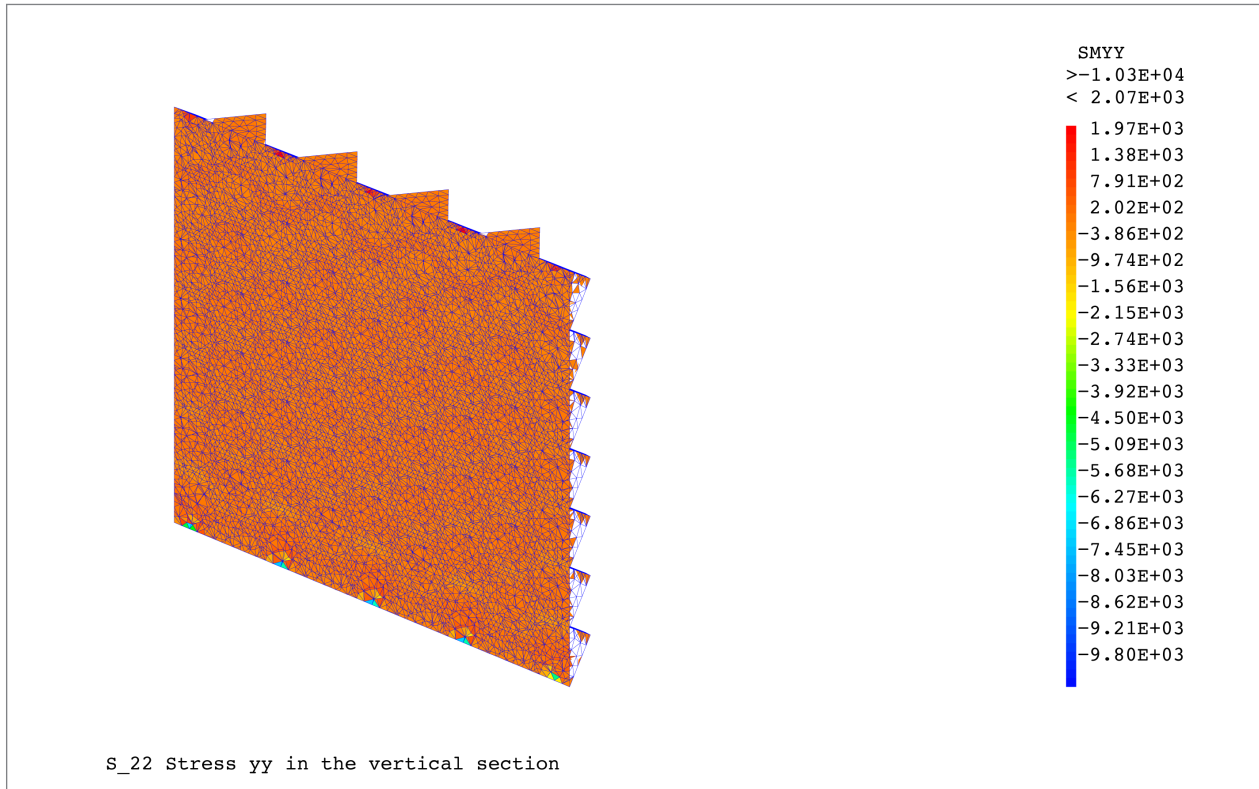
[Fig. 56] Grafico degli spostamenti verticali dei cubi nel piano del pannello XZ [m].



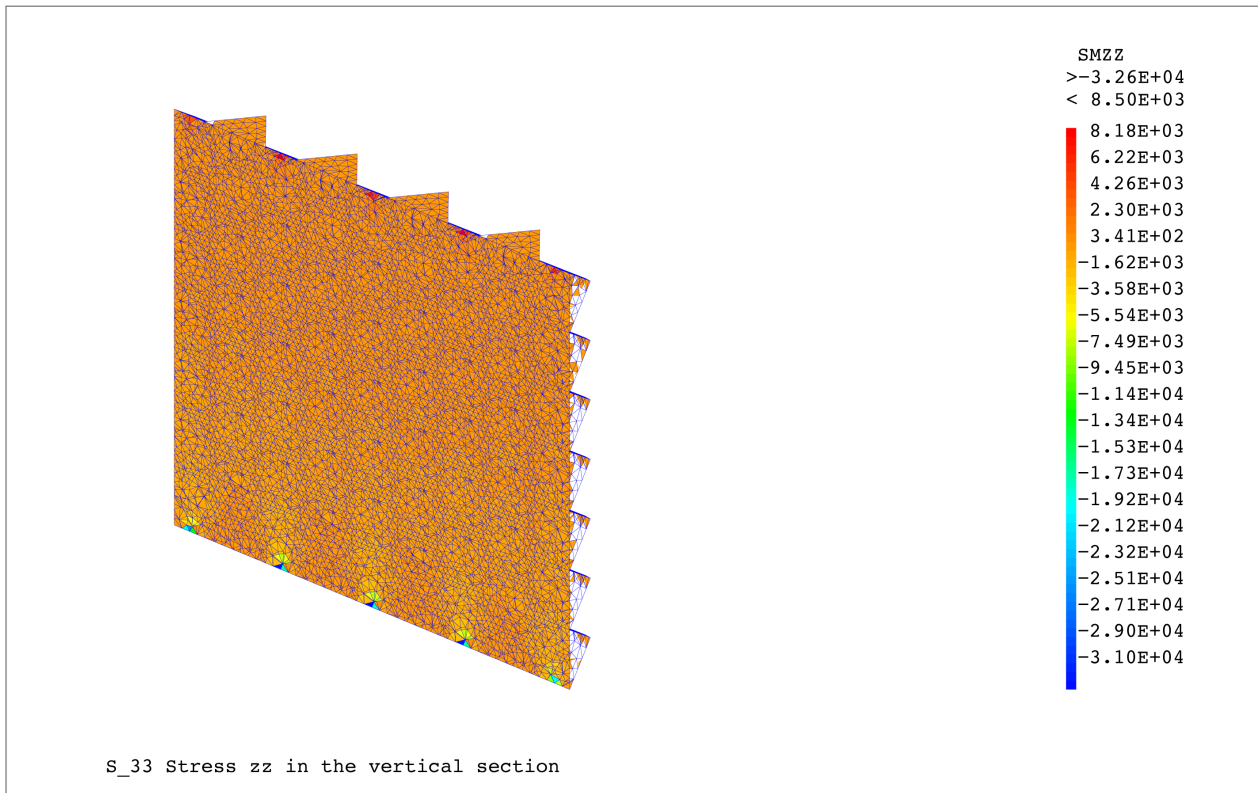
[Fig. 57] Grafico degli spostamenti verticali dei cavi nel piano del pannello XZ [m].



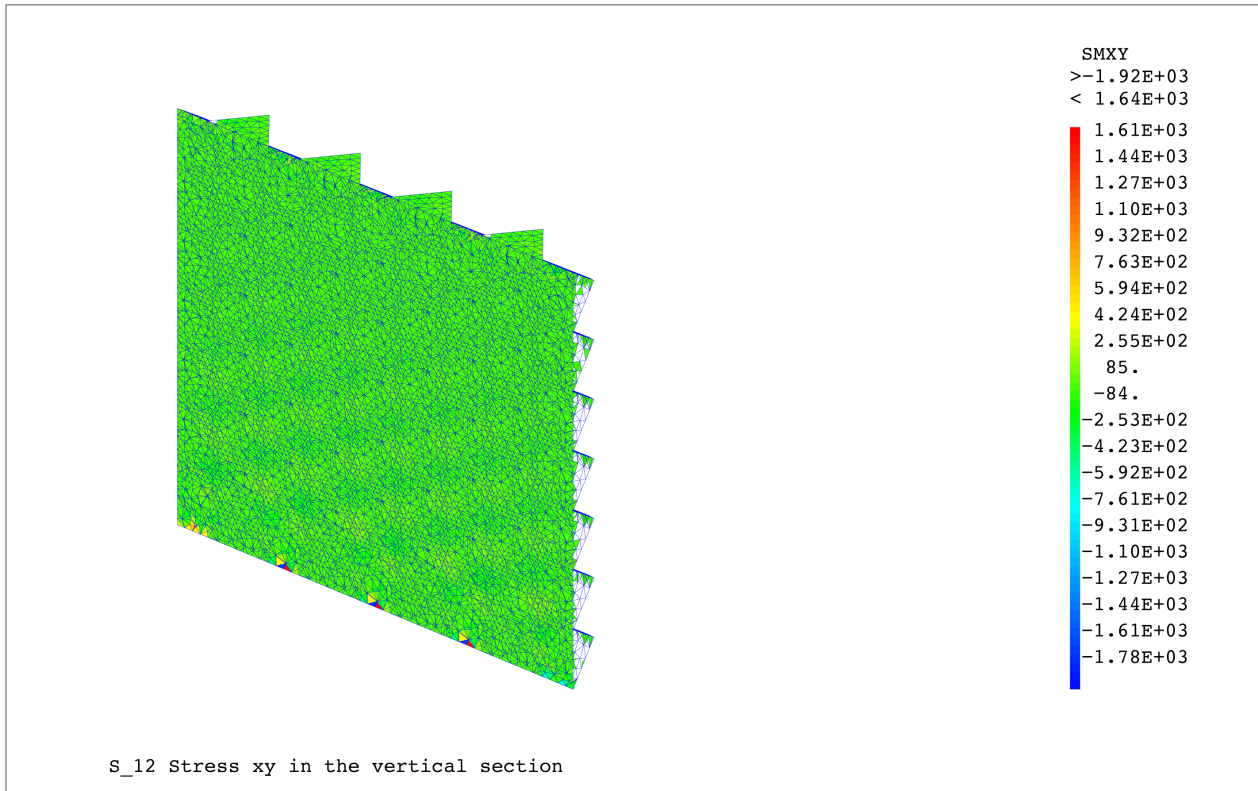
[Fig. 58] Grafico delle tensioni normali σ_{11} nella sezione mediana esagonale del pannello [Pa].



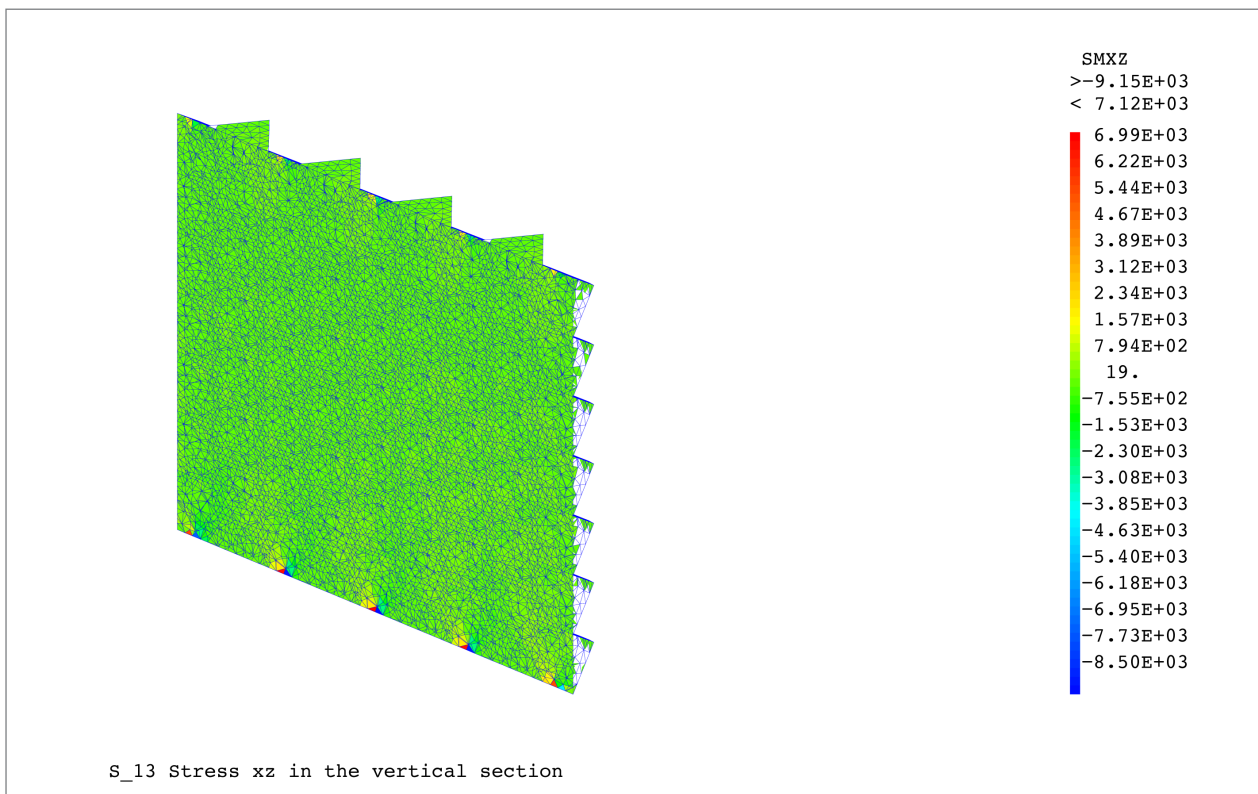
[Fig. 59] Grafico delle tensioni normali σ_{22} nella sezione mediana esagonale del pannello [Pa].



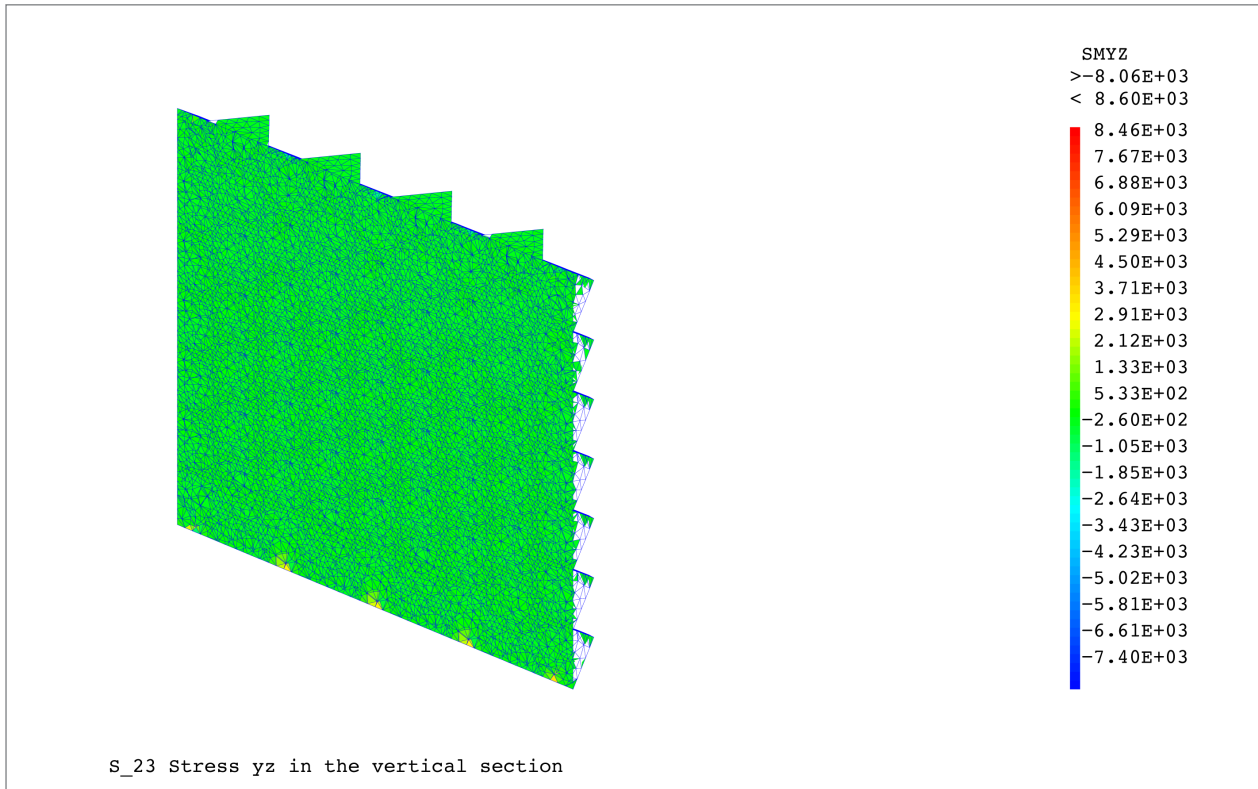
[Fig. 60] Grafico delle tensioni normali σ_{33} nella sezione mediana esagonale del pannello [Pa].



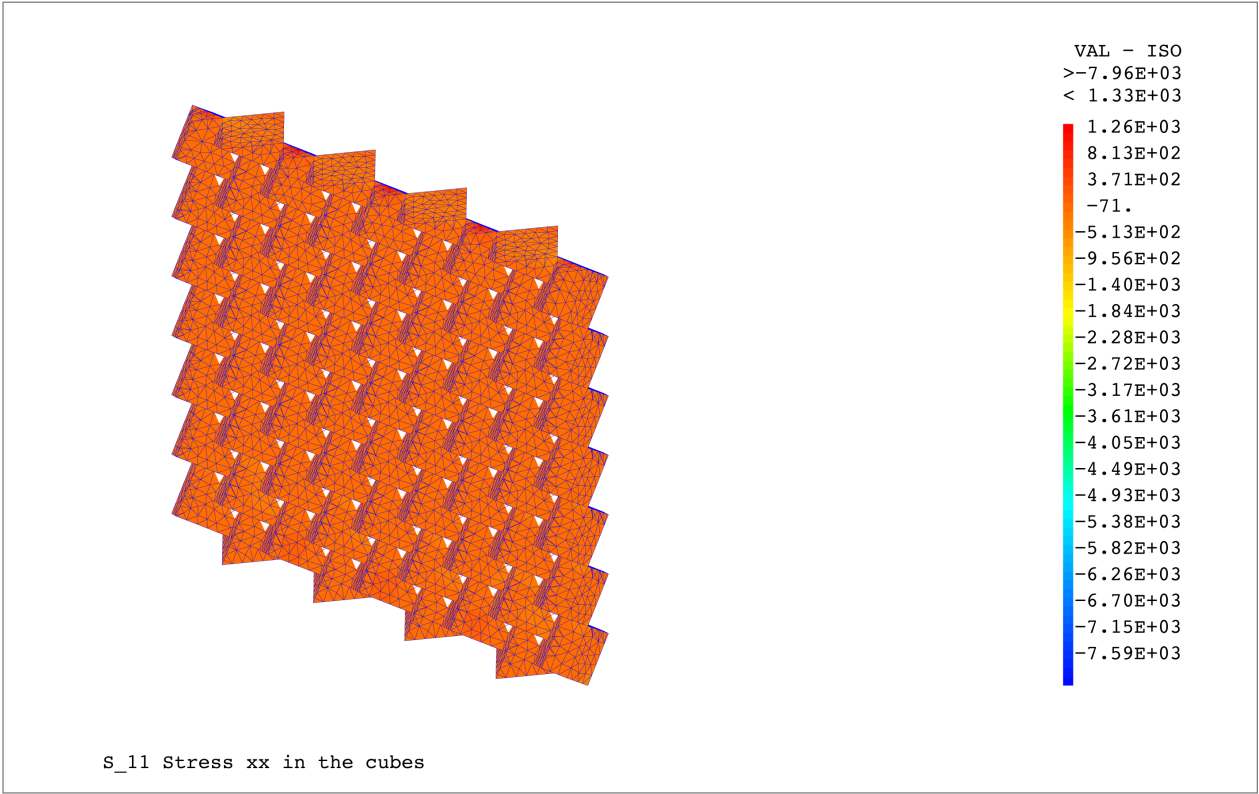
[Fig. 61] Grafico delle tensioni tangenziali σ_{12} nella sezione mediana esagonale del pannello [Pa].



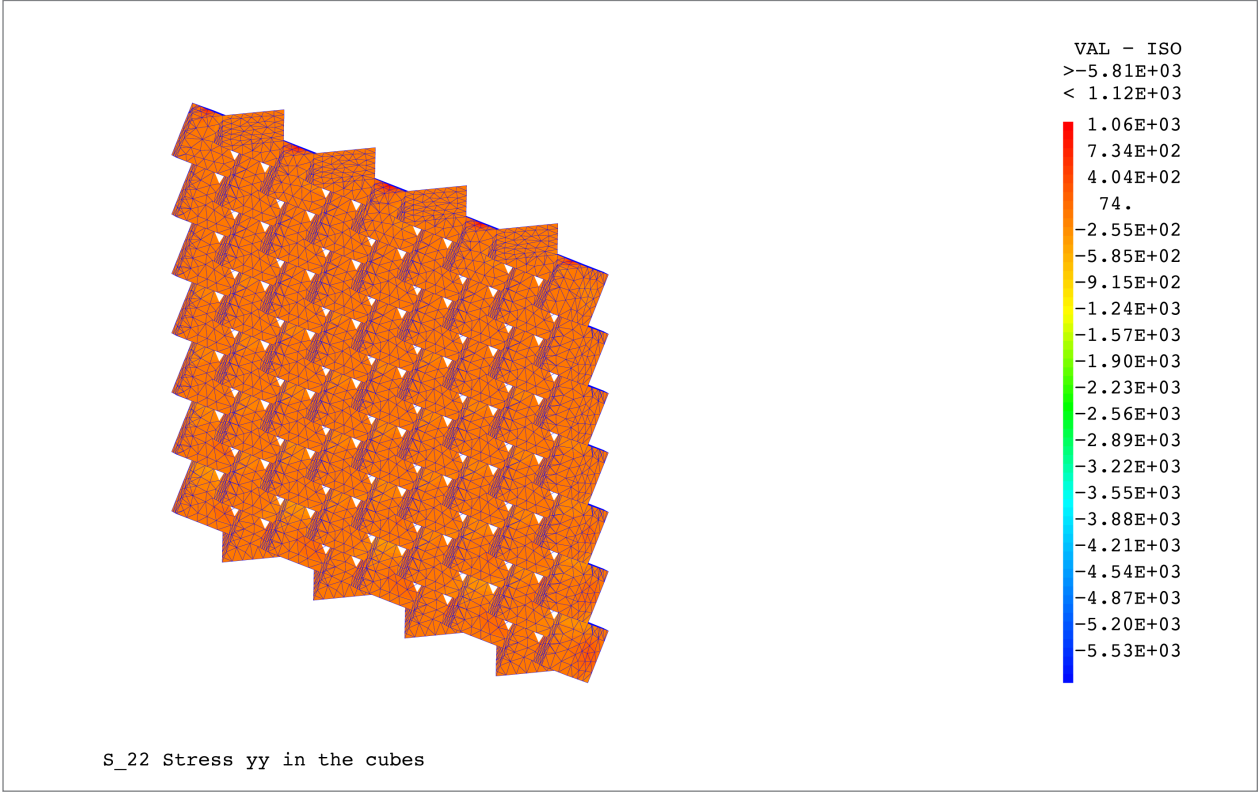
[Fig. 62] Grafico delle tensioni tangenziali σ_{13} nella sezione mediana esagonale del pannello [Pa].



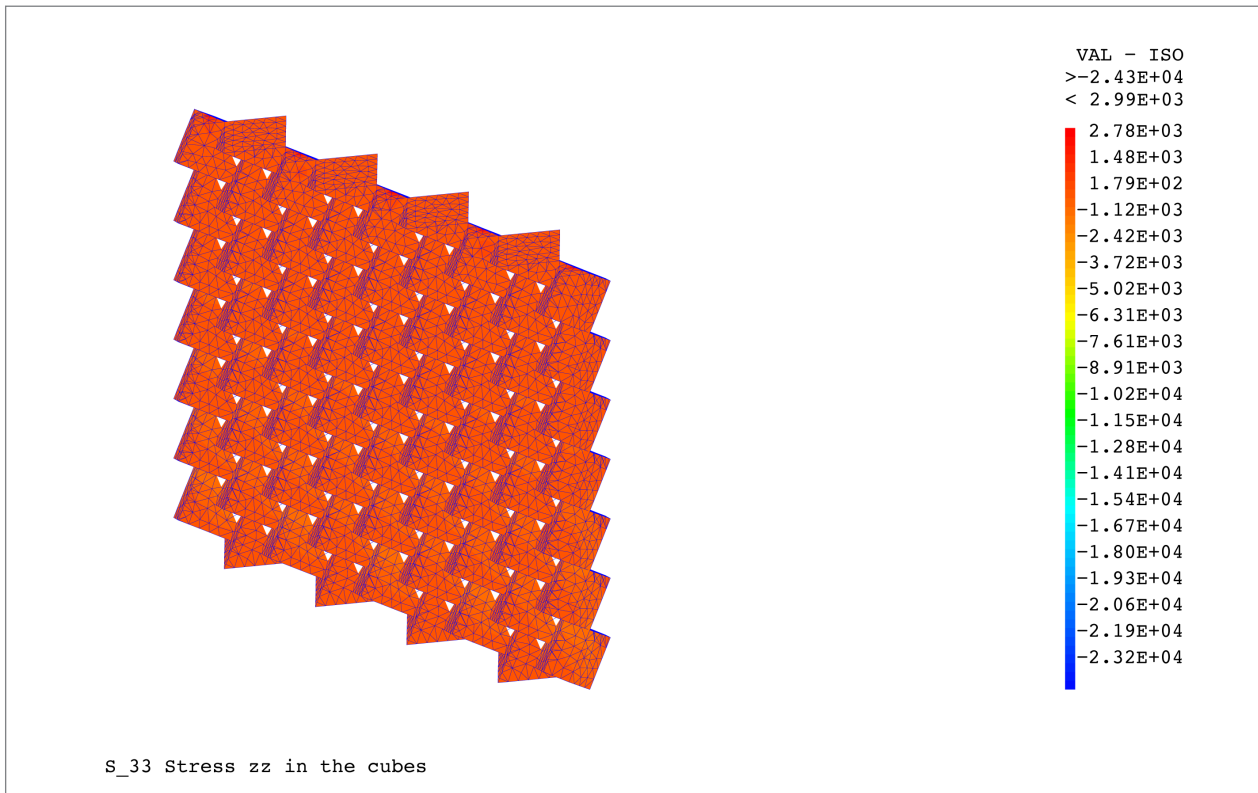
[Fig. 63] Grafico delle tensioni tangenziali σ_{23} nella sezione mediana esagonale del pannello [Pa].



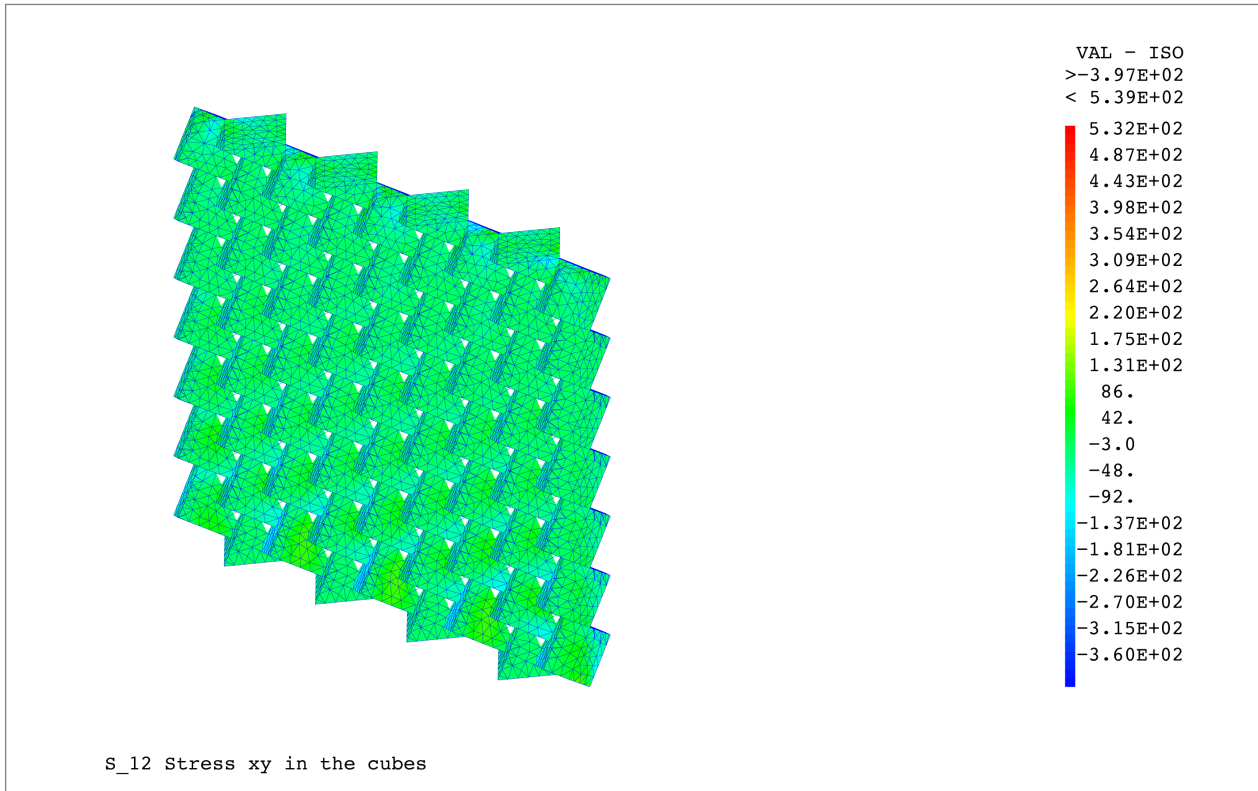
[Fig. 64] Grafico delle tensioni normali σ_{11} sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



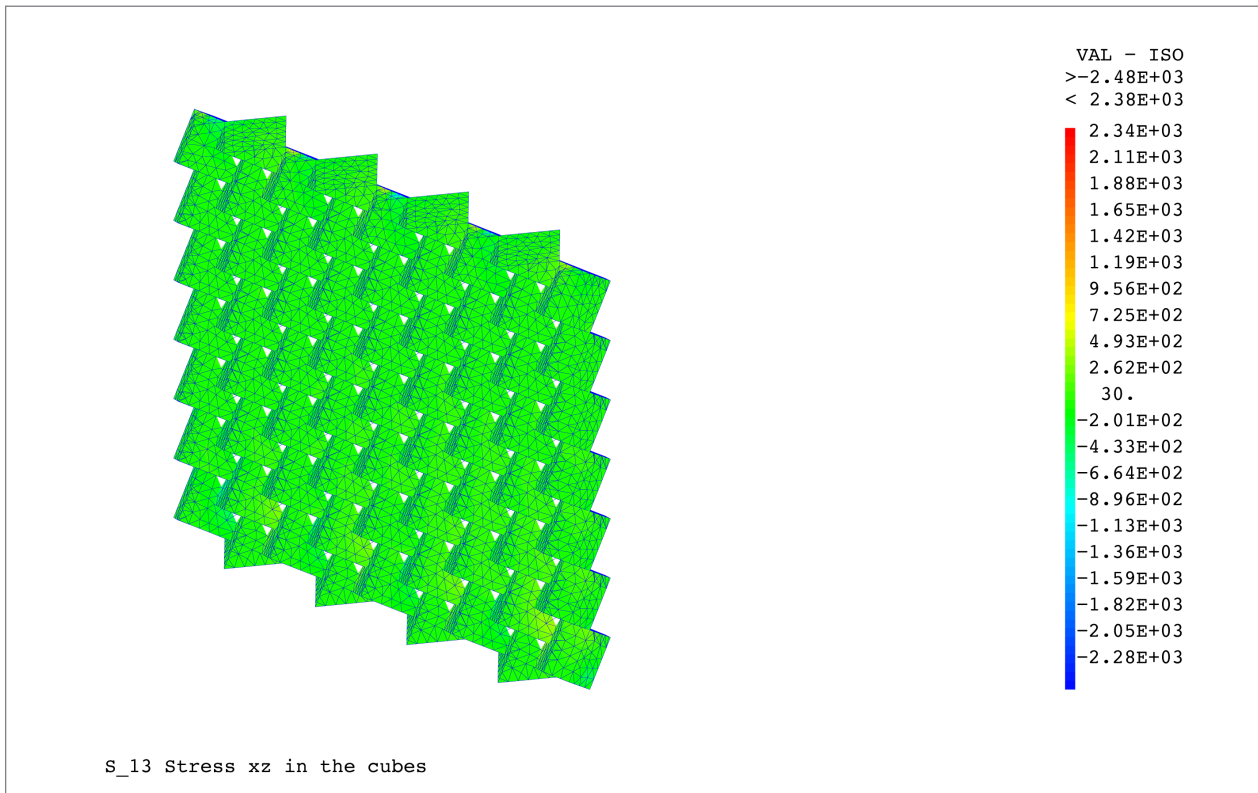
[Fig. 65] Grafico delle tensioni normali σ_{22} sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



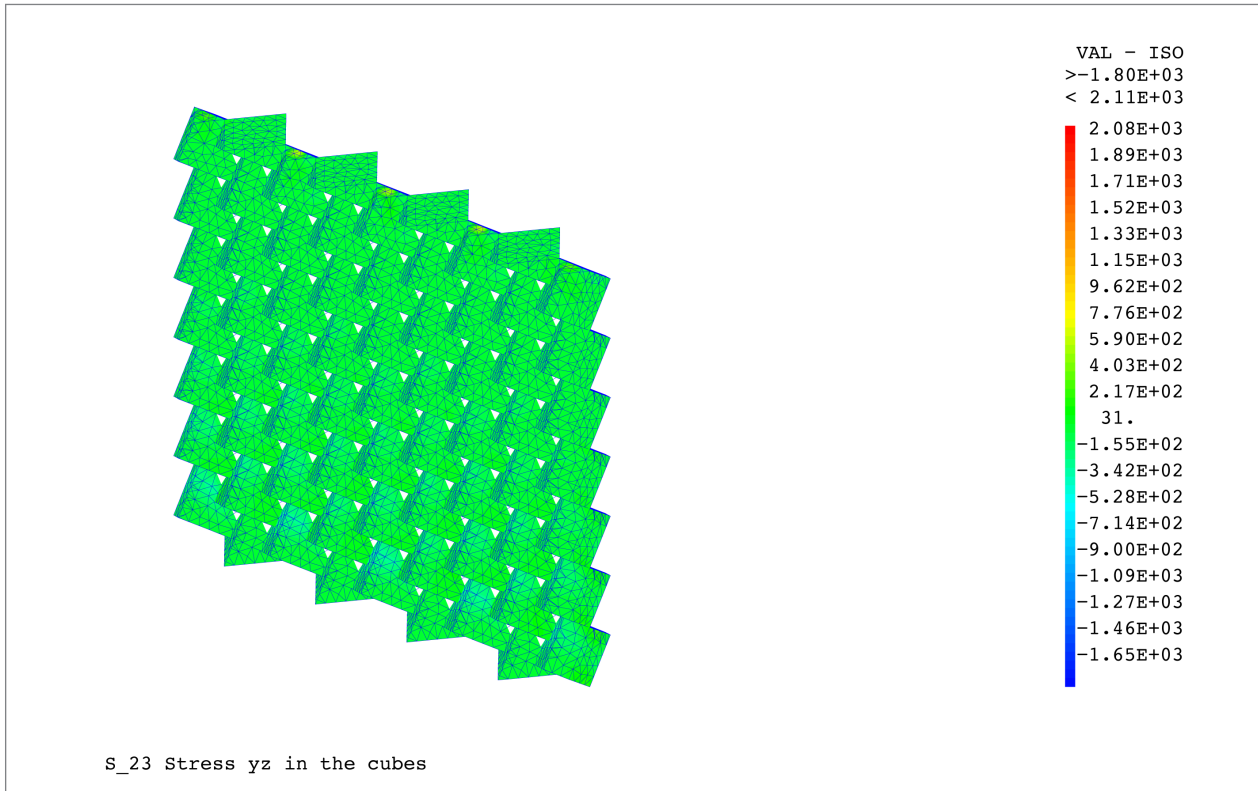
[Fig.66] Grafico delle tensioni normali σ_{33} sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



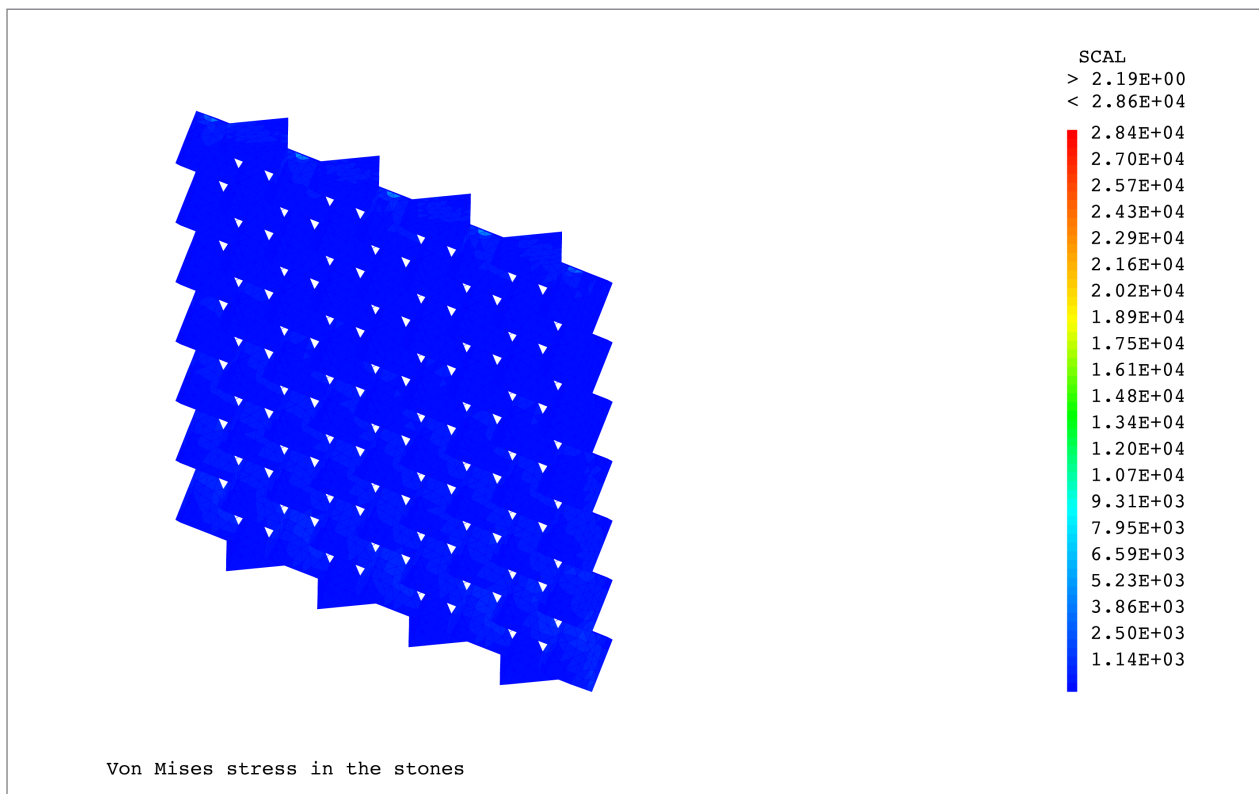
[Fig. 67] Grafico delle tensioni normali σ_{12} sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



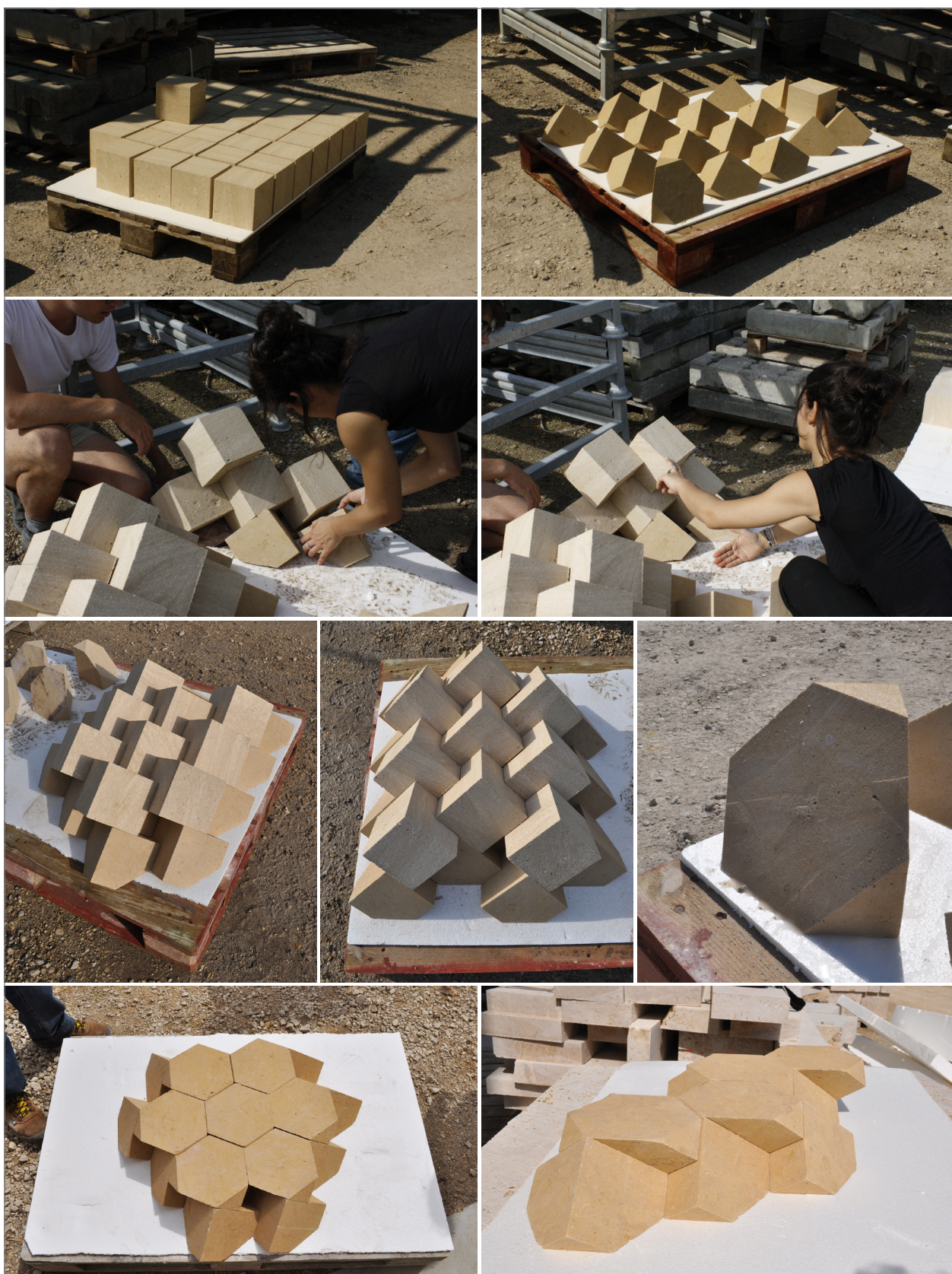
[Fig. 68] Grafico delle tensioni normali σ_{13} sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



[Fig. 69] Grafico delle tensioni normali σ_{23} sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



[Fig. 70] Grafico delle tensioni di Von Mises sulle superfici esterne dei cubi [Pa].



[Fig. 71] Conci cubici interi e sezionati dal piano medio necessari per realizzare il sistema autobloccante.

III.1.3 SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA E PROTOTIPAZIONE

Il passaggio dalla fase ideativa progettuale alla sua traduzione in forma costruita costituisce una fase fondamentale della ricerca, non solo in quanto raggiungimento di una più profonda comprensione del sistema, bensì anche come fase finale realizzativa di un modello reale su cui poter effettuare prove di carico e verifiche, al fine di definirne il comportamento strutturale e le modalità di posa in opera.

Le istanze teoriche e analitiche preliminari raggiungono così il loro senso più compiuto nella fase finale pratica e operativa, che costituisce l'essenza della ricerca, a illustrazione di un approccio metodologico valido di analisi e progetto, all'interno di un ambito così complesso come quello degli interventi di recupero sul costruito.

Il progetto ha visto due fasi distinte di sperimentazione costruttiva, a distanza di qualche mese l'uno dall'altro, al fine di verificare sperimentalmente i risultati ottenuti in via teorica.

Una prima fase di sperimentazione costruttiva del sistema di chiusura verticale, sotto forma di muro autoportante appoggiato a terra, privo di armatura, è stata svolta a Troyes, cittadina a sud-est di Parigi (giugno 2013).

Successivamente, una seconda fase di prototipazione in scala reale è stata svolta presso i *Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau* a Villefontaine, nei dintorni di Lione, nel contesto del programma didattico di esperienze costruttive organizzate dall'*École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais* (novembre 2013).

Per entrambe le sperimentazioni costruttive sono stati utilizzati cubi in pietra calcarea ($\delta=1.700 \text{ kg/m}^3$) proveniente dalla cava di Saint-Vaast-lès-Mello (Oise), a nord-est di Parigi. Questo materiale è stato fornito da *S.N.B.R. – Bâtiment régional (Société Coopérative Ouvrière de Production)*²⁶, un'importante impresa francese di restauro e tutela del patrimonio architettonico. S.N.B.R. sostiene da sempre le esperienze sperimentali di ricerca e di didattica condotte dal Laboratorio GSA, consentendo la realizzazione dei progetti proposti, studiati da dottorandi di ricerca, tesisti e stagisti.

Nonostante tale prototipazione sia stata fatta utilizzando cubi in pietra, le prospettive di ricerca prevedono l'impiego del materiale innovativo geopolimerico AAM, inorganico e plastico, colato all'interno di stampi di forma cubica, ottenuto dal riciclo di laterizi di scarto, dunque a basso impatto ambientale e dotato di una buona capacità termica isolante.

²⁶ *SNBR – Bâtiment régional (Société Coopérative Ouvrière de Production)* è un'importante impresa francese di restauro e tutela del patrimonio architettonico. I loro interventi e le loro ricerche sperimentali passano per il recupero del sapere tecnico della tradizione in pietra, anticamente fondata in Francia, grazie all'attività dei *Compagnons Tailleurs de Pierre*, che viene recuperato e re-interpretato secondo l'impiego delle tecnologie moderne. SNBR ha sempre sostenuto le esperienze sperimentali di ricerca e di didattica condotte dal *Laboratoire GSA – Structure Géométrie Architecture* (sede di cotutela del presente progetto di ricerca), consentendo la realizzazione dei progetti proposti, a lungo studiati dai dottorandi di ricerca, tesisti e stagisti.



[Fig. 72] Prima struttura: porzione di facciata di forma rettangolare, dotata di due elementi di rinfiacco per il contenimento delle spinte laterali verso l'esterno date dalle parti di volume in aggetto dei cubi laterali.

[Fig. 73] Seconda struttura: porzione di facciata di forma trapezoidale, priva di alcun elemento di rinfiacco laterale o confinamento esterno.

III.1.3.1 SPERIMENTAZIONE PRESSO S.N.B.R. (TROYES)

Una prima prototipazione del sistema costruttivo di facciata è stata realizzata durante il primo periodo di ricerca sotto la direzione del laboratorio francese, presso il *Parc d'Entreprises du Grand Troyes* (Sainte-Savine, Troyes), sede di S.N.B.R., grazie al supporto e al materiale da loro direttamente fornito [Fig. 71]. L'obiettivo principale di questa prima sperimentazione consiste nella verifica preliminare delle modalità di assemblaggio e della applicabilità costruttiva del sistema autobloccante TIM costituito da cubi, tradizionalmente pensate per gli orizzontamenti, impiegato per la realizzazione di strutture verticali.

Come rilevato all'interno del paragrafo precedente, per realizzare una porzione di facciata di forma rettangolare senza l'utilizzo di alcun elemento aggiuntivo di connessione fra i conci, occorre disporre degli elementi di contenimento per impedire il ribaltamento dei cubi laterali che presentano una piccola porzione del loro volume in aggetto rispetto ai cubi sottostanti su cui poggiano. Al fine di far fronte a questo sbilanciamento, è necessario predisporre due elementi di contenimento delle spinte dovute dagli aggetti dei cubi laterali, per equilibrare il sistema e garantire l'integrità della struttura. Questa soluzione è stata adottata durante la prima delle due strutture realizzate a Troyes [Fig. 72]. In alternativa, volendo rinunciare all'ausilio di due pareti di rinfilo laterale, la porzione di muro realizzabile presenta inevitabilmente una forma trapezoidale [Fig. 73].

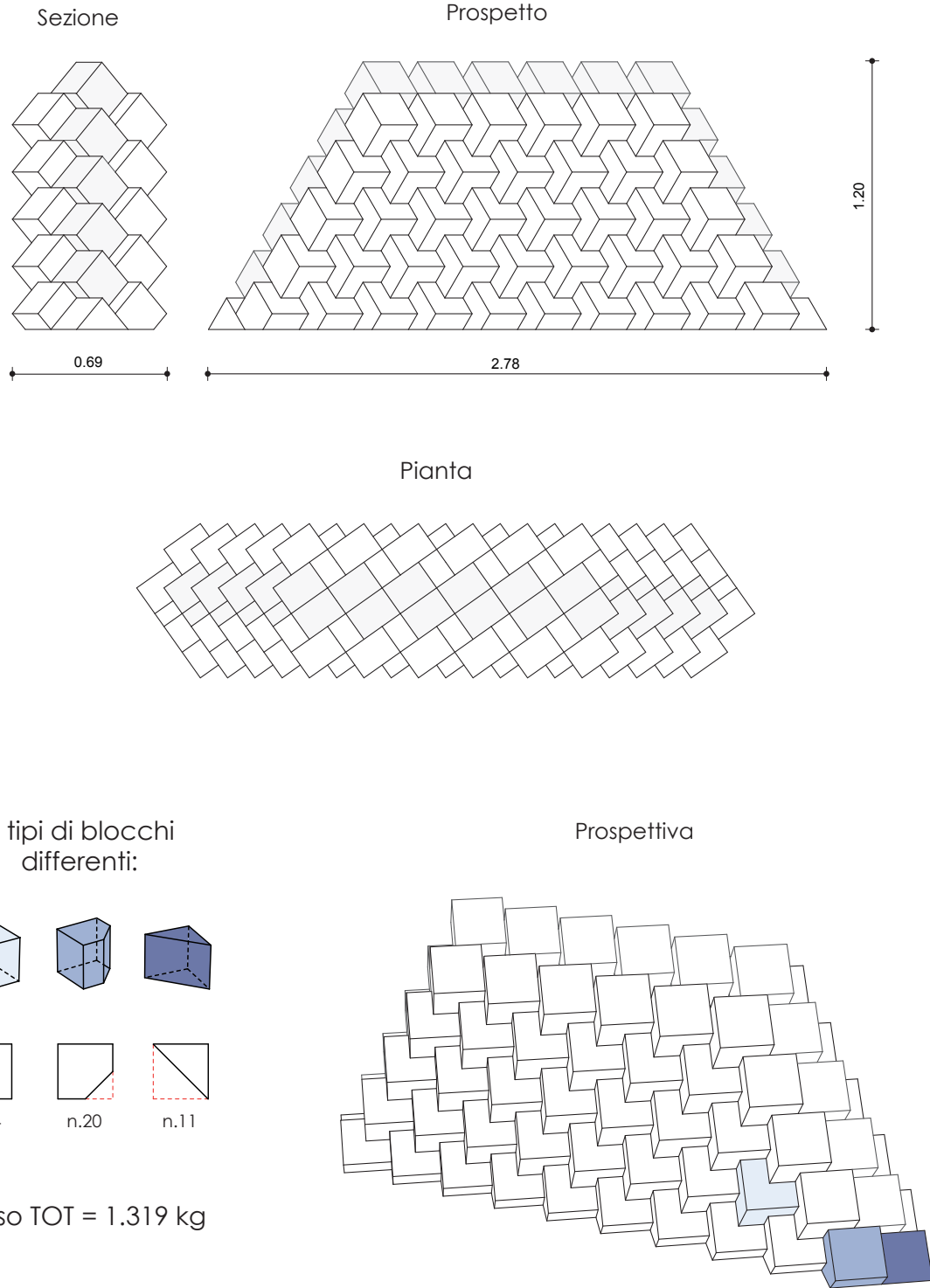
In seguito a questa prima sperimentazione costruttiva, si può dire che il sistema studiato presenta un'elevata rapidità e facilità di assemblaggio in opera degli elementi prefabbricati, caratteristica fondamentale per le tecniche di intervento a secco, in grado di garantire reversibilità, flessibilità e sostenibilità.

Nonostante le prime prototipazioni siano state fatte utilizzando cubi in pietra, l'orizzonte futuro di ricerca propone l'introduzione di un ulteriore elemento innovativo, dato dall'impiego del materiale geopolimerico AAM, ottenuto dal riciclo di laterizi di scarto, caratterizzato da buone proprietà di termiche isolanti e al contempo da un'elevata ecosostenibilità. Grazie all'estrema semplicità geometrica degli conci da assemblare, la prefabbricazione dei blocchi potrebbe avvalersi di differenti tecniche, in funzione delle loro dimensioni e delle proprietà del materiale: colatura all'interno di stampi o casseforme (materiale allo stato liquido), taglio con macchine a controllo numerico CNC o con Laser Cut (materiale allo stato solido), fabbricazione con *3D Printing* (materiale compatibile con le caratteristiche delle stampanti 3D per la stampa di modelli digitali CAD).

Le indagini condotte durante lo svolgimento del progetto di ricerca si focalizzano sullo studio del sistema costruttivo proposto, valutando le proprietà del materiale innovativo AAM e l'eventuale compatibilità con altri materiali, al fine di ipotizzare possibili stratigrafie di facciata per la realizzazione di un involucro "attivo", adattabile in funzione delle specifiche caratteristiche costruttive dell'edificio oggetto di intervento e delle esigenze di riqualificazione energetica ed architettonica.

Atelier Pierre "Pavage Hexagonal"

Sperimentazione costruttiva _ MURO A DOPPIO STRATO NON ARMATO



[Fig. 74] Progetto esecutivo del muro a doppio strato non armato realizzato ai GAIA.

III.1.3.2 SPERIMENTAZIONE PRESSO *LES GRANDS ATELIERS DE L'ISLE D'ABEAU* (VILLEFONTAINE, LIONE)

La seconda sperimentazione costruttiva è stata svolta presso *Les Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau*, situati a Villefontaine (Lione), a metà novembre 2013. Durante l'Atelier Pierre - Pavage Hexagonal", gli studenti dell'ENSAPM - *École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais* hanno approfondito il tema dei sistemi autobloccanti sotto la guida dei professori e dei dottorandi del *Laboratoire GSA – Géométrie Structure Architecture*.

L'atelier si dedica all'approfondimento del sistema costruttivo a secco proposto per la realizzazione di superfici, basato sull'assemblaggio di elementi identici assemblati tra loro a costituire una struttura bidirezionale in cui essi siano topologicamente autobloccati, grazie agli sforzi reciprocamente scambiati in virtù delle loro proprietà geometriche.

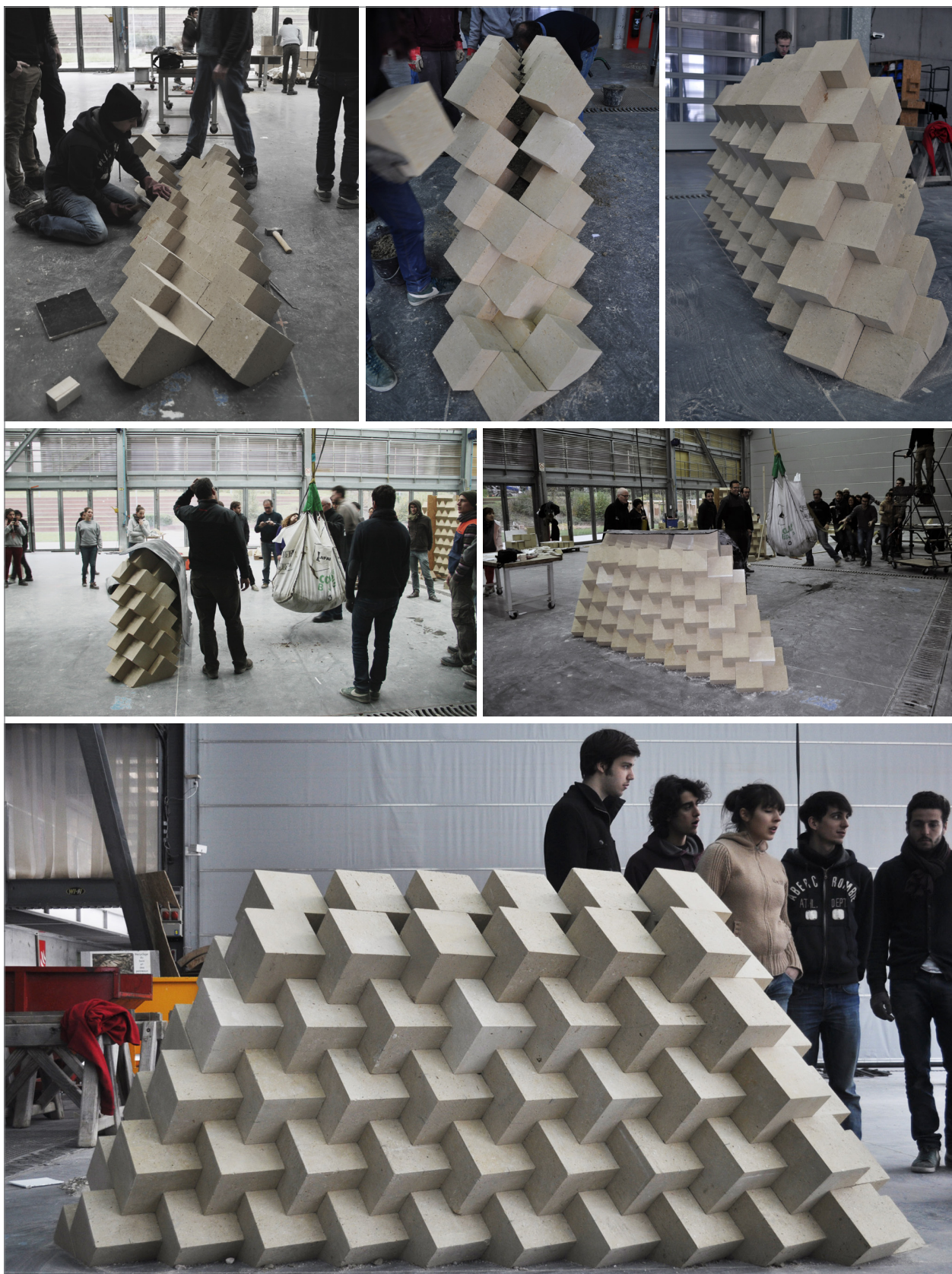
All'interno di questa struttura, lo spostamento di ogni elemento è impedito dalla presenza di un identico elemento, immediatamente adiacente a esso, e pertanto ogni concio è mantenuto stabile nella sua posizione. L'esistenza di questa categoria di elementi autobloccanti apre nuovi orizzonti per la generazione di morfologie per sistemi assemblati dotati di un'elevata resistenza meccanica, adottabili per la realizzazione di strutture bidirezionali orizzontali e verticali.

Grazie alla sperimentazione costruttiva, l'atelier ha verificato l'applicabilità del sistema autobloccante associato a due componenti edili differenti: un sistema di orizzontamento (volta piana) e un sistema di partizione verticale (pannello di facciata). In particolare, l'atelier ha previsto la realizzazione di due tipi di solaio e di due tipi di muro, costituiti dall'assemblaggio di cubi di lato 20 cm in pietra calcarea, ciascuno del peso di 13,6 kg circa.

Non è questa la sede per illustrare l'esperienza di prototipazione in scala reale del sistema di solaio autobloccante che, nonostante abbia portato interessanti esiti costruttivi, non costituisce l'oggetto del progetto di ricerca. Pertanto, all'interno di questo capitolo, viene riportata esclusivamente l'esperienza relativa alla realizzazione delle due strutture verticali, armate e non armate, al fine di evidenziarne le criticità e le potenzialità e di delineare possibili orizzonti futuri di ricerca.

La prima struttura consiste in un muro a doppio strato non armato, di forma trapezoidale, con intercapedine riempita mediante una miscela di terra e altro materiale inerte per il miglioramento del peso e della resistenza del sistema [Fig. 74].

Per verificare qualitativamente la stabilità del muro massivo a gravità, si svolge una prova di carico, applicando al baricentro del muro un peso di 3.800 kg, con una certa spinta data dal braccio e dal periodo di oscillazione del peso. Il test effettuato dimostra che il sistema altamente massivo presenta un'elevata resistenza al ribaltamento e, dunque, presenta ottime qualità in relazione a una sua possibile adozione per la realizzazione di muri di sostegno e altre opere di contenimento delle spinte [Fig. 75].



[Fig. 75] Fasi di costruzione e prova di carico del muro a doppio strato non armato.

La seconda struttura consiste in una porzione di facciata monostrato, di superficie pari a circa 6 m^2 ($L \times H = 3 \times 2 \text{ m}$), di forma rettangolare, dotata di un'armatura interna costituita da cavi di acciaio disposti verticalmente al fine di migliorare la stabilità e l'integrità del sistema in vista del conseguente sollevamento del pannello [Fig. 76, 77].

I sistemi assemblati oggetto di studio si basano sull'equilibrio delle forze reciproche scambiate tra ogni singolo concio e i sei blocchi adiacenti. Nel caso di un sistema bidimensionale orizzontale, per garantire questo equilibrio, è necessario inserire una cornice di chiusura dell'insieme, la cui azione di compressione si combina con le forze scambiate tra i blocchi. Nel caso di un sistema bidimensionale verticale, invece, il peso gravitazionale di ogni singolo cubo, trasmesso ai cubi degli strati sottostanti, è sufficiente a garantire l'appoggio tra gli elementi, e dunque lo scambio delle forze di compressione tra i conci, in corrispondenza delle loro superfici di contatto.

Come rilevato precedentemente, lungo i fianchi della facciata in oggetto occorre comunque inserire un dispositivo di contenimento laterale delle spinte durante la fase di assemblaggio, al fine di impedire il ribaltamento dei cubi disposti lateralmente quando i tiranti non sono in azione: essi, infatti, salvo configurazioni che prevedano un troncamento del cubo, presentano la metà del loro volume in aggetto rispetto al blocco sottostante su cui poggiano.

L'obiettivo principale dell'esperienza costruttiva di cantiere consiste nella realizzazione di una porzione di facciata di dimensione rettangolare, in grado di conservare le sue proprietà di integrità e stabilità durante la fase di esercizio, nel ruolo di pannello di tamponamento appeso all'estremo superiore e ancorato alla sommità dell'edificio.

La soluzione adottata per raggiungere questo obiettivo consiste nell'inserimento di n. 6 sottili tiranti metallici (cavi in acciaio $\varnothing 4$), di passo regolare, per la ripresa delle forze verticali e il successivo "appendimento" della facciata. Infatti, una volta ultimata l'elevazione del muro, il sistema viene sollevato, lasciato sospeso a una certa altezza, e liberato da tutti gli elementi puntuali lignei di supporto provvisorio, appositamente sagomati, utilizzati come carpenteria per sostenere temporaneamente i cubi laterali durante la realizzazione.

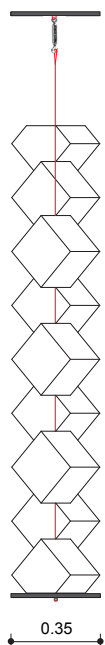
L'esperienza costruttiva è finalizzata ad esplorare principalmente le problematiche di posa in opera del sistema costruttivo, a valutarne qualitativamente le capacità resistenti, nel caso duplice di un muro non armato appoggiato per terra e di un pannello di facciata appeso all'estremità superiore, armato con cavi in acciaio che lavorano a trazione. Come ogni altro sistema di muratura a gravità, anche la costruzione di un muro costituito da cubi autobloccanti avviene per linee orizzontali successive, dal basso verso l'alto.

La prima operazione da compiere consiste nella conformazione precisa degli elementi da assemblare [Fig. 78]. Come illustrato nel disegno di dettaglio della foratura dei blocchi [Fig. 77], alcuni di essi devono presentare un particolare foro o una particolare scanalatura, al fine di alloggiare i cavi $\varnothing 4$ in acciaio di armatura del sistema.

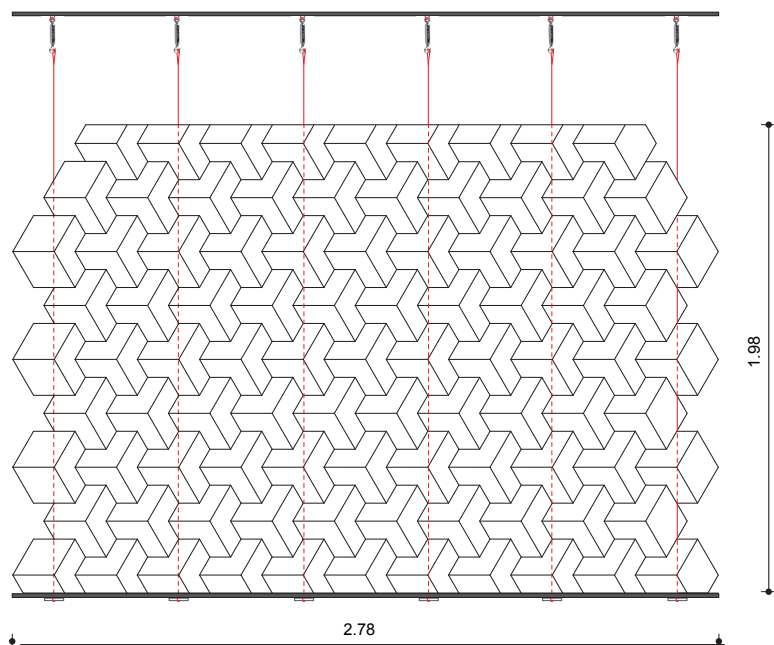
Atelier Pierre "Pavage Hexagonal"

Sperimentazione costruttiva _ MURO MONOSTRATO ARMATO

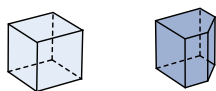
Prospetto
laterale



Prospetto frontale



2 tipi di blocchi
differenti:



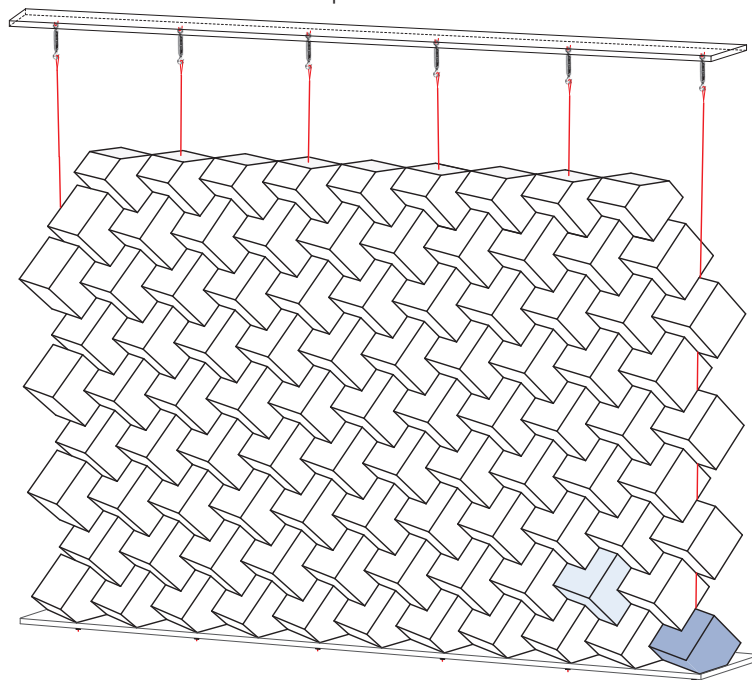
n.73

n.20

n. 6 cavi metallici Ø4
l=2,50 m

Peso TOT = 1.240 kg

Prospettiva

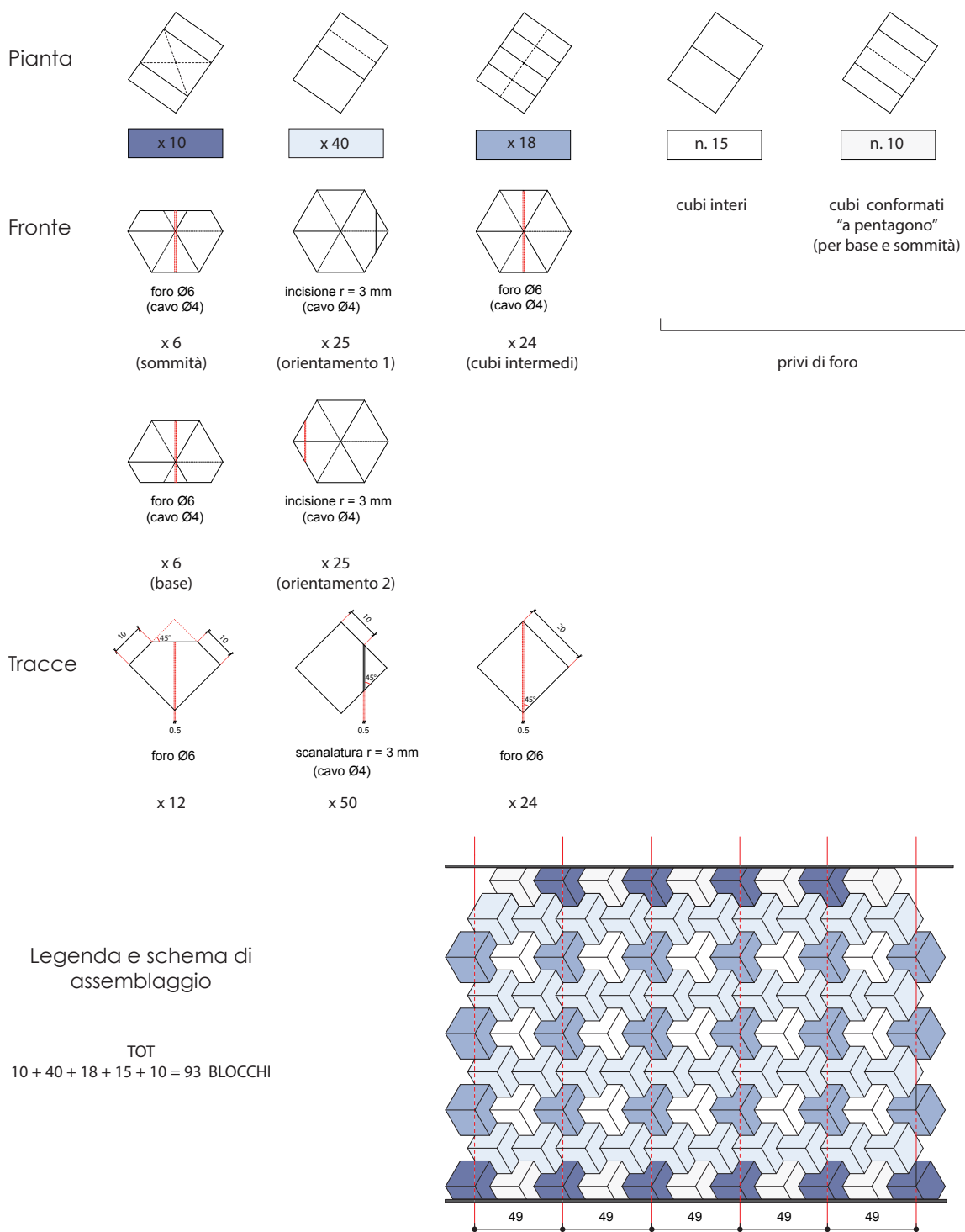


[Fig. 76] Progetto esecutivo della porzione di muro monostrato armato realizzata ai GAIA.

Atelier Pierre "Pavage Hexagonal"

Sperimentazione costruttiva _ MURO MONOSTRATO ARMATO

Dettaglio di foratura dei blocchi per l'inserimento dei cavi in acciaio Ø4



[Fig. 77] Progetto esecutivo e dettaglio della configurazione dei singoli conci cubici (lato 20 cm).



[Fig. 78] Taglio e foratura dei conci cubici da assemblare secondo la configurazione di progetto.

[Fig. 79] Preparazione del supporto ligneo di base del muro, dotato di fori per l'ancoraggio dei cavi di armatura.

[Fig. 80] Assemblaggio iniziale di una porzione di muro trapezoidale, per procedere soltanto successivamente all'accostamento dei cubi laterali, servendosi dell'ausilio di cunei lignei temporanei, appositamente sagomati.

Una volta preparate le differenti tipologie di conci lapidei, nel corretto numero, prima di cominciare con l'assemblaggio dei blocchi di basamento, occorre predisporre il supporto di base, costituito da un'asse di legno (spessore 3 cm), adeguato a resistere alla flessione dovuta al peso dell'intero muro (1.240 kg) e alla trazione che si svilupperà conseguentemente al sollevamento dei tiranti [Fig. 79].

La tavola di legno ($L \times l = 3 \times 0,35$ m) viene forata con un passo di 0,49 m, al fine di alloggiare i tiranti, le cui estremità sono adeguatamente piegate e bloccate per impedire il loro sfilamento dai fori effettuati nella base di legno. Naturalmente, durante l'intera fase di costruzione, tale tavola di supporto deve essere mantenuta rialzata mediante opportuni cunei lignei, in modo tale da comprendere lo spessore aggiuntivo dovuto alle asole di chiusura dei tiranti che, non essendo inglobate nel legno, rimangono esterne.

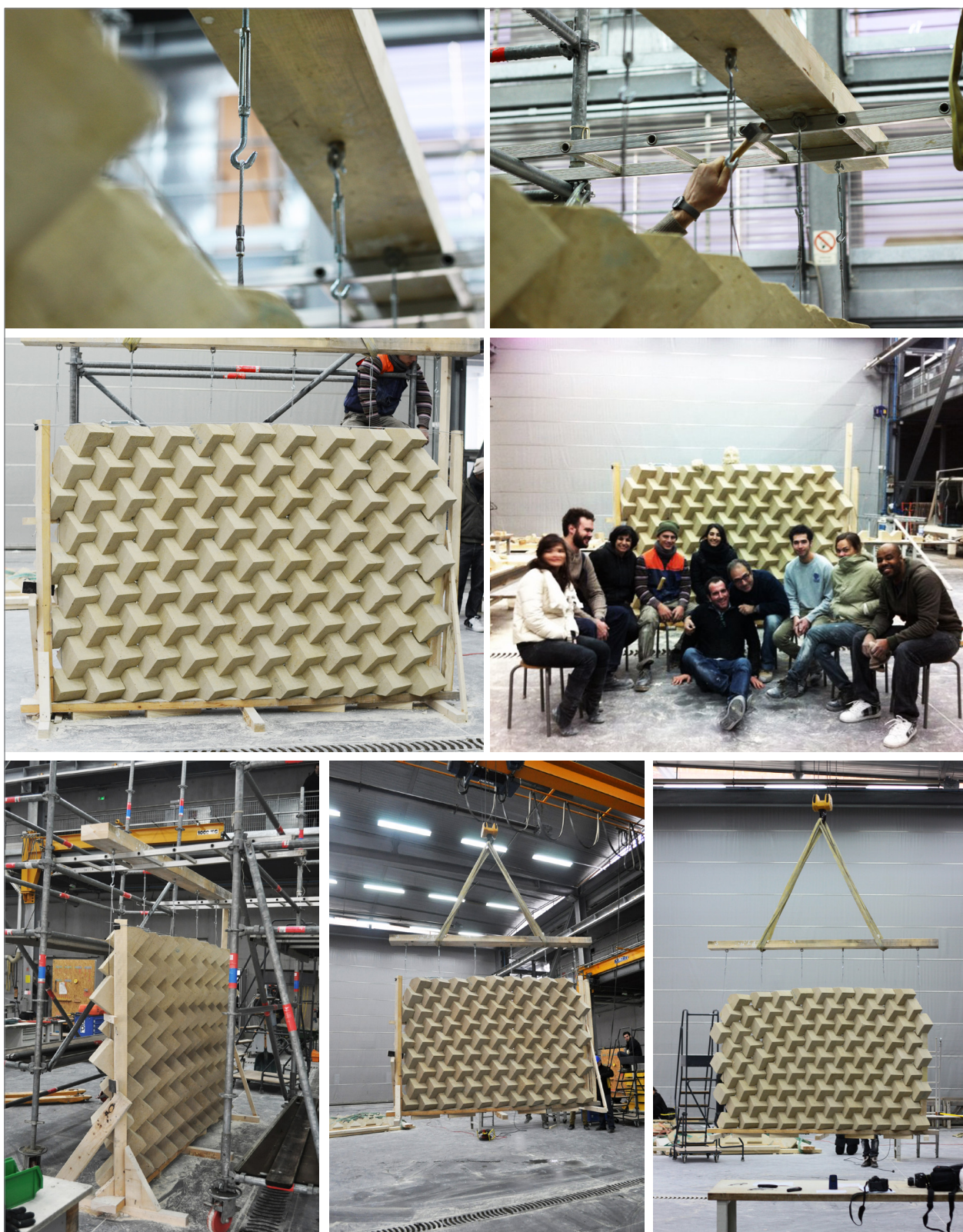
Una volta realizzata una base di appoggio stabile, si comincia con l'assemblaggio del muro, partendo dalla fila di base, costituita da n. 11 conci conformati "a pentagono". È possibile assemblare il muro procedendo per file orizzontali, facendo scorrere i cubi lungo i cavi, analogamente a come si infila il filo nelle perle di una collana. Partendo da una delle due estremità, si comincia infilando il primo cavo (lungo 4 m) all'interno del foro Ø6 di uno di questi conci dotati di foratura, proseguendo con l'affiancamento di un identico concio non forato, e ancora con un altro blocco forato, proseguendo alternandoli.

Ultimata la prima fila di base, si prosegue per linee orizzontali successive, dal basso verso l'alto. Il procedimento di assemblaggio risulta abbastanza semplice e rapido, ad eccezione dei cubi disposti lateralmente che, come evidenziato sopra, presentano problemi di ribaltamento laterale. Pertanto, si decide di procedere preliminarmente all'assemblaggio di una porzione di muro trapezoidale, per dedicarsi soltanto successivamente all'accostamento dei cubi laterali, servendosi dell'ausilio di appositi cunei lignei [Fig. 80].

Una volta terminata la porzione trapezoidale di muro (con base maggiore e minore costituita relativamente da n.11 e n.3 blocchi), si procede con il completamento delle porzioni laterali di muratura, servendosi di cunei lignei "a due becchi", appositamente sagomati per essere collocati sopra lo spigolo superiore del cubo sottostante, fornendo così un appoggio per la posa dello spigolo inferiore del nuovo cubo, a completamente della fila superiore.

Un ulteriore accorgimento riguarda la necessità di controventare il sistema nel senso ortogonale al piano di facciata, durante lo sviluppo in elevazione del muro di altezza finale pari a 2 m, al fine di evitarne l'oscillazione e il ribaltamento fuori dal piano.

Inoltre, è opportuno servirsi anche di due elementi laterali, fissati tanto alla base di legno (tramite viti), quanto alle loro estremità superiori (tramite un tirante di acciaio), in modo da inserire un elemento di contenimento delle spinte verso l'esterno dei cubi laterali, sempre più gravose all'aumentare dell'altezza [Fig. 81].



[Fig. 81] Predisposizione del sistema di chiusura dei cavi e di ancoraggio all'elemento sommitale per il sollevamento del pannello; rimozione della carpenteria provvisoria di rinfiacco e sostegno dei conci laterali, una volta entrati in trazione i cavi di armatura.

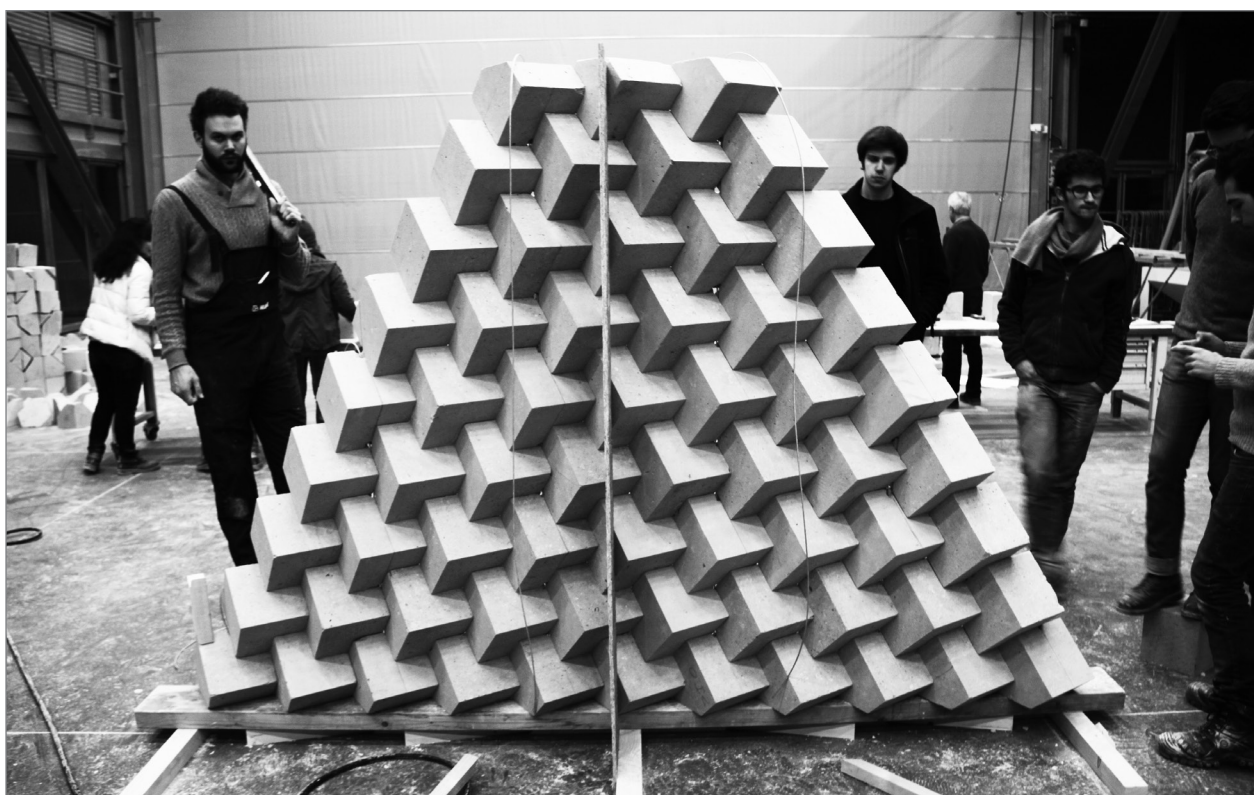
Tutti questi dispositivi provvisori vengono rimossi una volta che l'intero sistema viene sollevato, dunque una volta che i tiranti cominciano a lavorare.

Oltre alla verifica della stabilità e della resistenza meccanica del sistema di involucro, il principale obiettivo dell'esperienza didattica di cantiere svolta presso *Les Grands Ateliers de L'Isle d'Abeau* consiste nella verifica del sistema di assemblaggio e messa in opera della tecnologia innovativa di facciata autobloccante. A questo proposito, in conclusione, si può dire che i punti più critici e delicati del processo di posa in opera riguardano la conformazione dei singoli blocchi e, in particolare, la foratura degli stessi, per consentire l'alloggio dei cavi.

Inoltre, un altro obiettivo della sperimentazione costruttiva riguarda la verifica del funzionamento strutturale del sistema, armato con cavi in acciaio, lavoranti grazie all'azione di sollevamento del pannello di facciata. L'idea di sollevare e appendere il pannello nasce dalla volontà di simulare un possibile utilizzo della porzione di facciata come un pannello appeso alla sommità dell'edificio (ad esempio in corrispondenza del cordolo perimetrale sommitale), e non come una struttura autoportante appoggiata al suolo.

Il sistema previsto di ancoraggio verticale, disposto come in figura, attiva la sua azione tirante soltanto una volta sollevato il sistema, consentendo di migliorare notevolmente l'integrità del sistema. Una volta azionati i tiranti, si può dire che il sistema autobloccante raggiunge una situazione di equilibrio e stabilità, dimostrando buone proprietà di resistenza e integrità nel piano del pannello e nel piano ortogonale ad esso.

Per questa tipologia di strutture, il trasferimento dei carichi tra gli elementi assemblati avviene tramite le superfici di contatto e le forze scambiate reciprocamente tra loro, la cui azione è combinata alle forze peso di ogni singolo concio. In questo modo, si ottiene un sistema autobloccante dotato di un'elevata resistenza meccanica e di un'elevata integrità, all'interno del quale nessuno dei blocchi costituenti il pannello può essere rimosso dal piano.



[Fig. 82, 83] Assemblaggio iniziale di una porzione di muro trapezoidale, per procedere soltanto successivamente all'accostamento dei cubi laterali, servendosi dell'ausilio di cunei lignei temporanei, appositamente sagomati.

III.1.4 VERIFICA DELLE TECNICHE DI MESSA IN OPERA E DEI REQUISITI PRESTAZIONALI

A conclusione della sperimentazione costruttiva, si può affermare che il sistema autobloccante studiato, costituito dall'assemblaggio di esaedri identici tra loro, normalmente adottato per la realizzazione di volte piane, è impiegabile anche per la costituzione di una struttura bidirezionale verticale di facciata [Fig. 82-85].

Nonostante il sistema abbia presentato buone proprietà meccaniche, al termine dell'esperienza si riscontrano visivamente molteplici punti critici, specialmente in rapporto ad errori e imprecisioni legate alla posa in opera, seppure di entità minima. Tali difetti di assemblaggio riscontrati nella struttura finale, come la non completa aderenza dei cubi in corrispondenza delle superfici di contatto, e la conseguente presenza di microfessure tra i cubi, derivano dall'accumulo di errori microscopici e tolleranze minime avvenuto durante il processo di conformazione dei blocchi e di loro assemblaggio, procedendo dalla base del muro fino alla sua sommità.

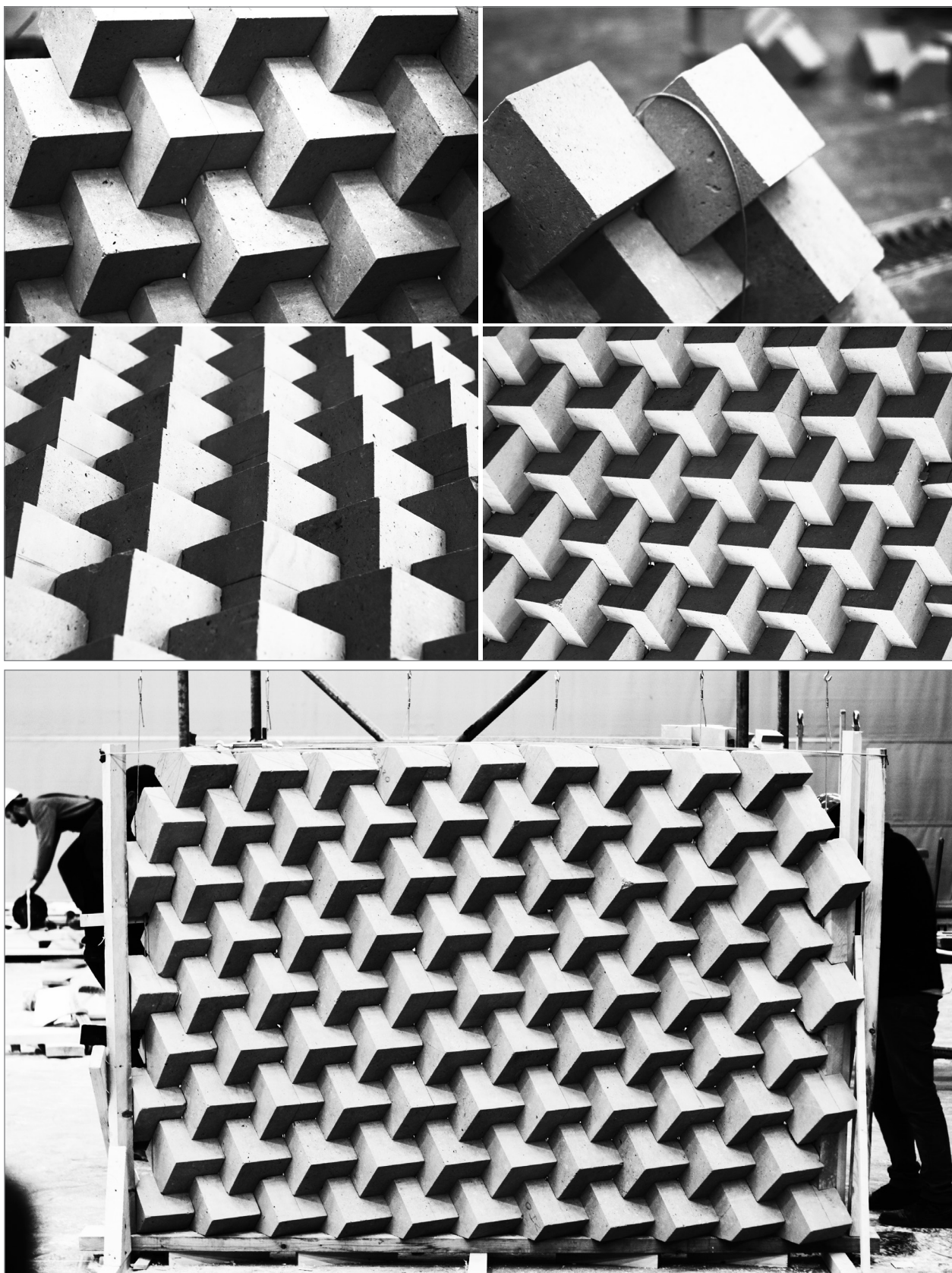
Per quanto riguarda la fase di configurazione dei blocchi da assemblare, i problemi di precisione sono risolvibili mediante l'utilizzo di macchine. Infatti, la fase di taglio e foratura dei blocchi, qualora venisse realizzata grazie al supporto di macchine CNC a controllo numerico, interfacciate con sistemi CAD-CAM, risulterebbe notevolmente più precisa. In alternativa, qualora il materiale geopolimerico AAM presentasse una viscosità e una composizione adeguata per essere stampato dagli ugelli a deposito di materiale impiegati dalle moderne stampanti 3D, un processo di produzione simile porterebbe a un risultato finale analogamente preciso per la realizzazione di cubi.

Inoltre, per quanto riguarda le problematiche relative alla precisione durante la fase di assemblaggio, qualora i blocchi fossero assemblati da manodopera specializzata o da robot a bracci meccanici, l'assemblaggio della facciata risulterebbe definitivamente più preciso, riportando una maggiore continuità di facciata, sia in termini prestazionali che estetici.

Infine, il materiale impiegato e la dimensioni dei blocchi possono essere rivisitati, al fine di ridurre il peso e la dimensione degli elementi e, di conseguenza, rendere più agevole l'assemblaggio, agendo così a favore di un'ottimizzazione del processo di messa in opera, a fronte di una riduzione dei margini di errore accumulabili durante l'elevazione della facciata.

Infine, al termine di questa seconda prototipazione in scala reale del sistema, dopo aver constatato la stabilità del sistema di facciata e il suo buon funzionamento meccanico, è possibile ipotizzare di integrare ulteriori dispositivi all'interno del sistema, al fine di migliorarne le prestazioni. Ad esempio, uno dei primi interventi possibili riguarda l'inserimento di cavi orizzontali, passanti per il baricentro dei cubi, come nel caso dei cavi disposti verticalmente. Analogamente a quanto accade per i tiranti verticali, tali dispositivi orizzontali contribuirebbero a eliminare le spinte e gli spostamenti dei singoli elementi e, dunque, agirebbero a favore di una maggiore integrità del sistema.

Un ulteriore intervento che potrebbe contribuire alla massimizzazione della resistenza mec-



[Fig. 84, 85] Disegno chiaroscurale suggestivo del sistema autobloccante TIM di facciata.

canica del sistema autobloccante TIM consiste nella pretensione dei tiranti, la cui messa in opera ed efficacia potrebbe essere valutata durante ulteriori sperimentazioni costruttive realizzabili, supportate da analisi meccaniche svolte con appositi software, all'interno di futuri scenari di sviluppo della ricerca.

Infine, l'inserimento di giunti tra i blocchi costituirebbe un ulteriore accorgimento a favore della compensazione degli errori: ulteriori ricerche potrebbero valutare il materiale migliore con cui realizzare giunti dalle proprietà fisiche e meccaniche ottimizzanti la resistenza del sistema autobloccante.

Nonostante le potenzialità emerse dal sistema di pannellatura in cubi autobloccanti, le sperimentazioni costruttive hanno messo in luce le criticità legate non tanto all'assemblaggio dei conci che, se configurati mediante l'impiego di macchine a controllo numerico CNC, consentono un rapido montaggio e una buona qualità dell'esito estetico finale, bensì al sistema di ancoraggio puntuale del sistema prefabbricato alla facciata esistente. Un aspetto rilevante, che meriterebbe lo sviluppo di ulteriori ricerche approfondite, riguarda la risoluzione dei punti critici del sistema costruttivo, non soltanto in corrispondenza dei punti di ancoraggio meccanico puntuale alla facciata, bensì anche ai punti di discontinuità in corrispondenza di angoli, finestrature, sommità e base. Futuri scenari di ricerca rivolti ad approfondire queste tematiche potrebbero sicuramente portare alla messa a punto di un sistema costruttivo efficace ed efficiente in termini prestazionali, energetici e sismici, oltre che dall'esito architettonico finale soddisfacente.

III.2 II SISTEMA DI INVOLUCRO A TRAMA ESAGONALE *G-SKINNED* - *GEOPOLYMERS* - *SUSTAINABLE KEY FOR AN INNOVATIVE ENVELOPE DESIGN*

(CIRI EDILIZIA E COSTRUZIONI – ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITÀ DI BOLOGNA)

Il II Sistema innovativo di involucro a trama esagonale *G-SKINNED* - *Geopolymers* - *Sustainable Key for an innovative Envelope Design* è studiato in collaborazione con il CIRI Edilizia e Costruzioni dell'Università di Bologna, presso il quale è stato possibile svolgere la sperimentazione diretta di un materiale innovativo geopolimerico per l'isolamento termico.

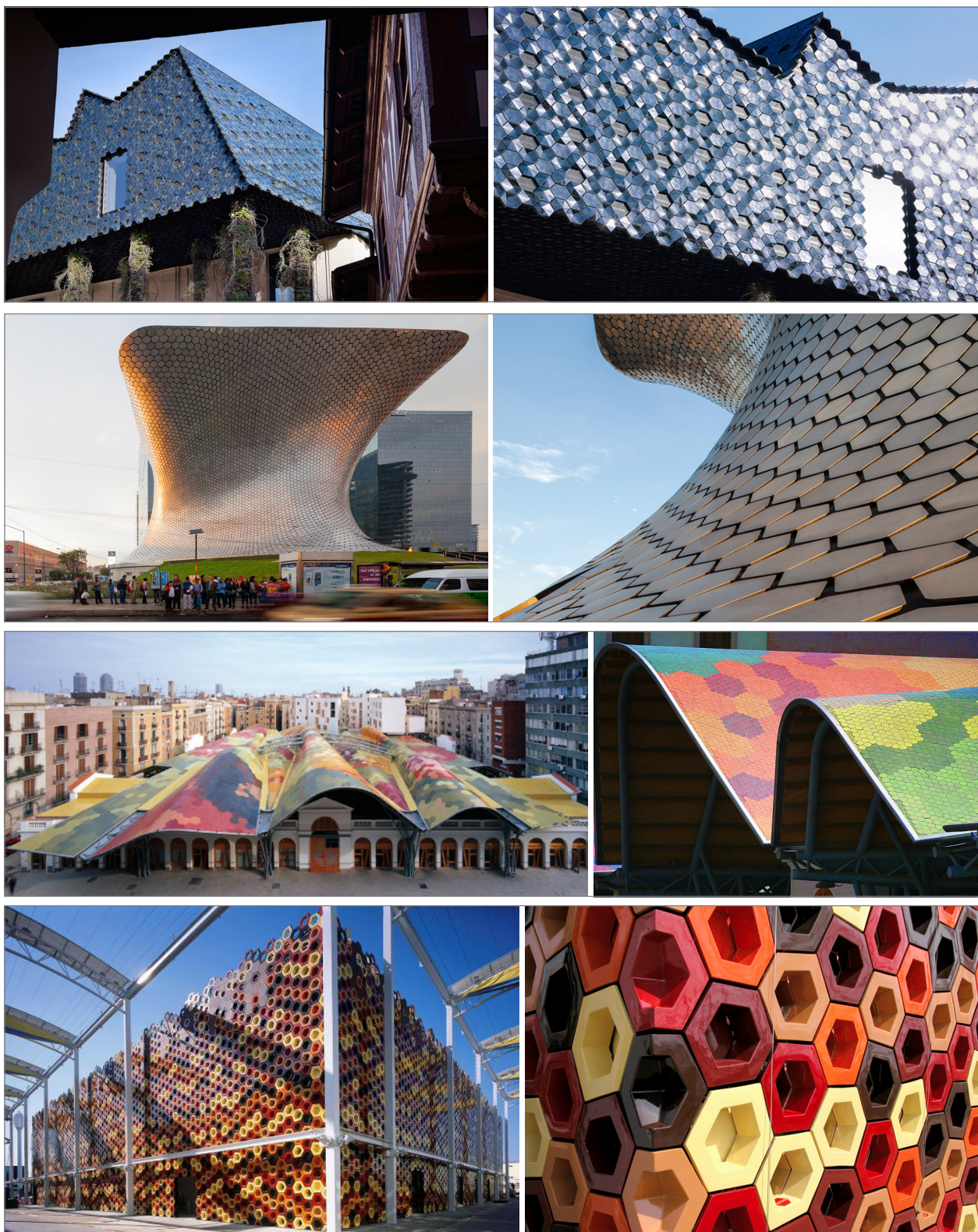
Una delle problematiche più complesse che deve affrontare attualmente il settore edilizio, dal ruolo sempre più importante all'interno della crescita economica di ogni paese, riguarda il recupero e la riqualificazione degli edifici esistenti, sia dal punto di vista architettonico e funzionale, sia da quello prestazionale ed energetico.

Considerando gli avanzamenti effettuati mediante gli interventi volti alla sostenibilità, riconoscibili nel campo dell'efficienza energetica e dei materiali, in termini di energia grigia da essi inglobata, il recupero degli edifici è considerato un fattore fondamentale, evidenziando come un edificio con un'ampia durabilità e capacità di riutilizzo possa corrispondere a un'alta produttività a lungo termine delle risorse. Infatti, la riqualificazione energetica degli edifici non soltanto riduce i consumi di risorse e materie prime, che nella maggior parte dei casi hanno raggiunto soltanto la metà del ciclo di vita, ma ne prolunga anche la funzionalità nel corso del tempo. Pertanto, si può dire che, in molti casi, le pratiche di recupero degli edifici corrispondono a una tipologia di intervento sostenibile, che consente di abbattere gli elevati costi di energia primaria legati alle operazioni di demolizione e ricostruzione.

Secondo una completa visione dell'edificio come un sistema complesso, costituito da un insieme di componenti edili che contribuisce a definire il comportamento prestazionale globale, nel rispetto dei principi di sostenibilità, acquista un ruolo determinante l'assunzione di un approccio progettuale che volga particolare attenzione ai requisiti ambientali a cui devono adempiere tutti questi elementi.

La progettazione delle parti essenziali dell'edificio, tra cui l'involucro, richiama l'interesse della ricerca sullo studio di nuove tecniche costruttive, sistemi tecnologici e materiali innovativi. In questo contesto si inserisce la ricerca svolta presso il CIRI, partendo dalla semplice valutazione delle prestazioni in termini di comportamento meccanico e termico di parti dell'organismo edilizio, volta a una più precisa definizione di comportamenti ecocompatibili, fino allo studio di una soluzione tecnico-costruttiva di insieme e di dettaglio.

Nei paesi dell'Unione Europea, il settore delle costruzioni contribuisce mediamente per il 21% circa alla formazione del PIL, a fronte del consumo di risorse non rinnovabili e dell'impatto ambientale superiore alla sua importanza economica. Di queste risorse, il settore edilizio assorbe



[Fig. 86] *Museum der Kulturen*, Herzog & De Meuron, Basilea 2011.

[Fig. 87] *Museo Soumaya*, Fernando Romero Enterprise, Città del Messico, 2012.

[Fig. 88] *Mercado de Santa Caterina*, Enric Miralles & Benedetta Tagliabue, Barcellona 2004.

[Fig. 89] *Spanish Pavillion*, Foreign Office Architects, Nagoya (Giappone) Expo 2005.

ogni anno oltre il 40% delle risorse minerarie non metallifere, oltre il 25% del legname, poco meno del 20% delle risorse idriche e circa il 40% di quelle energetiche bruciate. In questo contesto, emerge la necessità di promuovere l'impiego di materiali non derivati dal petrolio, a matrice rinnovabile, provenienti dal riuso e riciclo di scarti di produzione, affinché sia possibile una reale diminuzione dell'impatto ambientale e un ridotto consumo di CO₂ ed energia primaria per la produzione di materiali di costruzione.

Una nuova cultura della sostenibilità deve prevedere l'uso di materiali sostenibili che, impiegati all'interno di soluzioni a cappotto per gli edifici del patrimonio edilizio recente, presentino alcune qualità fondamentali: durabilità e capacità di invecchiare bene; minimizzazione del consumo di energia in fase di loro ottenimento, lavorazione, posa in opera, riciclo o dismissione; flessibilità e reversibilità nel tempo in base alle esigenze dell'utenza.

Uno degli aspetti imprescindibili del progetto di ricerca consiste nella volontà di sviluppare un sistema integrato che consenta di realizzare sistemi di facciata in grado di adattarsi alla morfologia dell'involucro esistente, permettendo conseguentemente di eseguire soluzioni "su misura". Le istanze e gli obiettivi della ricerca riguardano proprio la definizione di processi costruttivi eco-compatibili che rispettino tanto i requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative, quanto le esigenze di flessibilità progettuale e resa estetica, finalizzate a garantire esiti architettonici soddisfacenti.

Lo studio si muove a partire dalla riflessione legata all'attuale assenza di sistemi tecnologici di involucro "continui", che consentano di ottenere edifici ad elevate prestazioni energetiche, oltre che dotati di un buon comportamento strutturale. La ricerca è finalizzata a fornire strumenti e metodi operativi per progettisti e operatori negli interventi di riqualificazione architettonica del patrimonio edilizio recente, mediante l'impiego di soluzioni eco-compatibili, per il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro. In particolare, si propone una soluzione costruttiva per la riqualificazione dell'involucro esistente che, da elemento statico, lo trasformi in elemento "dinamico", capace di interagire con l'ambiente interno ed esterno, attraverso l'interoperabilità dei suoi componenti di facciata, in relazione alla variabilità e alla flessibilità delle sue prestazioni.

Il sistema proposto è costituito da pannelli prefabbricati, composti da una struttura a trama esagonale, in materiale riciclato leggero e resistente a base polimerica, realizzata con stampanti 3D per la produzione di modelli digitali CAD. Ogni pannello a trama esagonale estrusa presenta il duplice ruolo di conferire rigidità per forma e di fungere da cassaforma a perdere per contenere il getto della malta termicamente isolante.

La peculiare geometria esagonale del pannello offre la possibilità di ottenere uno specifico sistema di incastro tra i pannelli e, dunque, una riduzione dei sistemi di connessione tra i componenti e tra i pannelli stessi e la facciata esistente, con conseguenze benefiche anche in termini di riduzione dei ponti termici e di discontinuità dell'involucro. Inoltre, la sostenibilità del sistema di



[Fig. 90] *The Cube Restaurant*, Parl Associati, Londra 2012 (volume trasportabile, realizzato a Bruxelles nel 2011).

[Fig. 91] *Harpa Concert and Conference Centre*, Henning Larsen Architects, Reykjavik 2011.

[Fig. 92] *KREOD*, Chun Qing Li of Pavilion Architecture, Londra 2012.

[Fig. 93] *3D2Real*, Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK), Stoccarda 2009.

facciata consiste nell'impiego di un materiale isolante innovativo geopolimerico¹, inorganico ed ecosostenibile, chiamato *AAM - Alkali Activated Material*, ottenuto dal riciclo di polveri derivate da scarti di produzione del laterizio, attivate alcalinamente a temperatura ambiente, dunque mediante un processo a ridotto impatto ambientale.

Alla luce degli obiettivi e dei paradigmi di ricerca, considerando la versatilità applicativa del materiale innovativo AAM proposto per l'efficientamento energetico dell'involucro, sono state inizialmente elaborate alcune ipotesi progettuali per l'impiego di questo materiale isolante per la realizzazione di un sistema di involucro continuo a cappotto.

Come si vede per tutte le soluzioni progettuali illustrate successivamente, a partire dallo studio delle forme presenti in natura, le indagini morfologiche condotte hanno portato a disegnare una maglia strutturale costituita da celle di forma esagonale. In questa geometria si avverte un grande potenziale per la modulazione delle superfici di involucro: essa, infatti, consente di ottenere una tassellazione delle superfici corrispondente all'ottimizzazione geometrica dello spazio e, al contempo, alla massimizzazione della stabilità geometrica della configurazione strutturale. Inoltre, tale maglia esagonale consente di ottenere superfici dotate del più elevato grado di deformabilità e curvatura, al fine di progettare un nuovo involucro adattabile alla geometria dell'edificio esistente.

Anche dal punto di vista strutturale, la forma esagonale presenta interessanti proprietà di rigidità per forma, che motivano il suo utilizzo nel settore delle costruzioni, su varie scale, sia per la realizzazione di intere strutture, sia per la costituzione di anime di riempimento di pannelli o altri elementi bidimensionali. Analogamente, numerosi esempi presenti in natura di strutture costituite da una trama esagonale, la più suggestiva delle quali è l'alveare delle api, ne dimostrano le capacità resistenti per la realizzazione di strutture.

Proprio grazie alle interessanti proprietà geometriche dell'esagono, anche in Architettura è possibile trovare numerosi esempi di strutture ispirate a questa figura elementare regolare, motivate sia dalle proprietà meccanica di stabilità, sia dalle suggestive qualità formali ed estetiche. Tra questi esempi, si collocano differenti tipologie di componenti edilizi, quali le facciate verticali, le coperture inclinate, fino ad arrivare alle geometrie più complesse di intere strutture dalla forma organica e curvilinea [Fig. 86-93].

Lo studio di materiali innovativi per l'isolamento termico, sviluppato in collaborazione con il *CIRI – Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna, dedica specifica attenzione al tema del riutilizzo di scarti di lavorazione e di materiali di riciclaggio, a matrice rinnovabile.

La concezione del sistema costruttivo si orienta verso una sequenza di strati di materiali associati che interagiscono fra loro nella maniera ottimale, in modo compatibile e sinergico. In particolare, si individua un notevole potenziale nello sviluppo di una soluzione costruttiva di involucro

¹ Per *geopolimero* si intende un materiale sintetico a base di alluminosilicati, potenzialmente utilizzabile in vari sistemi, dotato di struttura amorfa.

continuo basata sull'impiego di pannelli prefabbricati di grande formato, in cui le proprietà isolanti siano affidate alla malta geopolimerica AAM, ottenuta dal riutilizzo di polvere di argilla cotta proveniente da scarti di lavorazione di laterizi, gettata all'interno di una struttura resistente dagli esiti architettonici soddisfacenti.

III.2.1 PROGETTAZIONE PARAMETRICA DEL SISTEMA COSTRUTTIVO

SISTEMI DI INVOLUCRO ATTIVO CON MATERIALI ECOSOSTENIBILI: *AAM - ALKALI ACTIVATED MATERIALS*

L'attuale evoluzione tecnologica nel settore dell'edilizia e della tecnologia dei materiali consente al progettista di intendere l'involucro edilizio non più come una rigida barriera di separazione tra interno ed esterno, bensì come un filtro attivo in grado di rispondere correttamente alle esigenze di risparmio energetico e di benessere, in funzione delle sollecitazioni interne ed esterne.

Nell'ambito degli interventi di riqualificazione del patrimonio edilizio, uno dei primari obiettivi riguarda la massimizzazione dell'efficacia e l'ottimizzazione energetica dell'involucro edilizio, costituito da superfici verticali, orizzontali o inclinate, opache e trasparenti. Gli interventi possibili per l'adeguato efficientamento energetico di un edificio esistente riguardano il miglioramento dell'isolamento termico dell'involucro, la correzione dei ponti termici, il miglioramento prestazionale di serramenti e vetri, e la mitigazione del comportamento energetico tramite ventilazione naturale e inserimento di vegetazione.

In questo contesto, occorre definire una strategia di intervento per realizzare una seconda pelle da giustapporre all'involucro esistente dell'edificio oggetto di intervento, che consenta di limitare il più possibile le perdite di calore per dispersione, contribuendo a garantire il contenimento dei consumi energetici nella stagione invernale, al fine di ottenere i miglioramenti prestazionali attesi.

Attualmente, la soluzione più diffusa impiegata negli interventi di recupero dell'involucro edilizio è rappresentata dalla realizzazione di una facciata ventilata, costituita da una struttura a telaio di supporto per la posa di pannelli leggeri di tamponamento.

A partire da un'analisi critica di questo sistema costruttivo, lo studio vuole passare all'elaborazione di un nuovo modello: la ricerca si focalizza sullo studio di una seconda pelle da giustapporre ai muri perimetrali del fabbricato esistente, costituita da pannelli prefabbricati a trama esagonale, contenenti il materiale isolante geopolimerico, ancorati alla parete esistente mediante un sistema di fissaggio meccanico puntuale, per l'aumento delle prestazioni energetiche.

Il carattere originale e innovativo della presente ricerca riguarda la gestione del processo, in fase di analisi, progetto ed esecuzione, attraverso l'impiego di strumenti di controllo computazionale che consentano di prevedere soluzioni tecniche "su misura" per il miglioramento della configurazione architettonica e prestazionale dell'involucro, capaci di adattarsi alle differenti caratteristiche morfologiche e tipologico-costruttive dell'esistente.

Tale possibilità è oggi offerta dagli strumenti di rilevazione con laser scanner e da quelli di progettazione assistita forniti dai software CAD-CAM, capaci di interfacciarsi con le macchine a controllo numerico CNC per il taglio e la conformazione dei pezzi. In altri termini, il processo che viene prefigurato è alternativo a quello della prefabbricazione basata sulla standardizzazione dei

componenti nell'esecuzione delle pelli tecnologiche, in quanto questi vengono definiti e dimensionati secondo le specifiche geometriche e costruttive del singolo edificio oggetto di intervento, sulla base di un procedimento tecnico che consente di avere ampi gradi di flessibilità.

L'uso di sistemi integrati CAD-CAM, relativamente di progettazione e di fabbricazione assistita da computer, consentono di semplificare il trasferimento di informazioni dalla prima alla seconda fase del processo, sopperendo così alle problematiche relative alla definizione geometrica degli elementi costruttivi, alla loro fabbricazione e successiva messa in opera. Si passa così da una progettazione di tipo tradizionale a una di tipo informatico che, avvalendosi di macchine a controllo numerico, offre la possibilità di realizzare elementi seriali dotati di una propria complessità formale, con elevata rapidità e precisione.

Questo tipo di approccio consente di superare l'impiego diffuso di criteri costruttivi basati su una marcata semplificazione formale delle soluzioni architettoniche, fondate sull'assemblaggio di elementi piano-lineari per l'involucro edilizio, giungendo all'elaborazione di forme più complesse e meglio adattabili alla configurazione spaziale tipologica.

Per la progettazione di un involucro edilizio dotato di queste proprietà, si ricorre all'assistenza di software di programmazione parametrica (quali *Rhinoceros+Grasshopper*) per la modellazione delle superfici, in grado di interfacciarsi con macchine per la produzione industrializzata degli elementi costruttivi. La metodologia prevista per l'elaborazione di questi moduli consiste nella progettazione generativa, che rappresenta un approccio avanzato della progettazione architettonica come sistema dinamico non lineare per la gestione della complessità del costruito.

Lo studio di un involucro architettonico attivo, in cui la geometria e la morfologia strutturale rivestono un ruolo fondamentale, è volto all'elaborazione di una metodologia progettuale basata sullo studio parametrico morfologico a livello di componente locale e di gruppo. Tali involucri a comportamento "dinamico" sono definiti da una stratificazione di materiali che per composizione, dimensionamento, e relative variazioni delle proprietà e dei principi di sostenibilità che li identificano, possono caratterizzare soluzioni costruttive che rispondano al meglio ai requisiti prestazionali dell'edificio. L'aspetto interessante concerne la variabilità, ossia la "dinamicità", della composizione del pacchetto costruttivo in funzione dell'orientamento e dell'articolazione interna. Uno degli obiettivi, dunque, consiste nella ricerca di un nuovo metodo di progettazione architettonica parametrica che consenta il controllo della totalità dei fattori da tenere in considerazione, offrendo allo stesso tempo una maggiore libertà di forma.

Questo ambito di ricerca, dunque, è finalizzato a promuovere, nei confronti del mondo industriale e degli operatori progettuali, l'innovazione di prodotto e di processo nel settore delle tecnologie di involucro finalizzate al risparmio energetico, favorendo la nascita di nuove iniziative mediante la realizzazione di prototipi in scala reale, realizzati con alta precisione mediante *3D Printing*, su cui verificare i requisiti prestazionali.

Alla base delle ipotesi progettuali avanzate, risiedono alcune riflessioni emerse da una analisi critica dei tradizionali sistemi costruttivi di involucro. Tradizionalmente, le classiche tecniche costruttive per l'assemblaggio di elementi prefabbricati a secco prevedono la realizzazione di pezzi preconfigurati che discretizzino la superficie secondo un sistema di pannelli e giunti. Alla luce delle problematiche riscontrate durante l'analisi dello stato dell'arte delle soluzioni tecnologiche esistenti nel settore edilizio, si vuole perseguire una continuità del sistema di involucro attraverso una maggiore omogeneità del materiale utilizzato, a fronte di una maggiore semplificazione del processo di fabbricazione.

Tra i vari criteri di intervento adottabili in ambito di recupero del patrimonio esistente, la ricerca si orienta verso l'efficientamento energetico del sistema edile di involucro, tendendo verso lo studio di una soluzione di "pelle tecnologica continua". La concezione del sistema costruttivo si orienta quindi verso una sequenza di materiali associati che interagiscano nella maniera ottimale e funzionino in modo compatibile e sinergico.

Il progetto di ricerca propone un sistema di facciata costituito da pannelli integrati prefabbricati, posti in opera a secco, costituito da quattro primari elementi: struttura resistente connessa mediante ancoraggio meccanico puntuale; strato coibente massivo in materiale di riciclo; strato microventilante; rivestimento esterno e strato di tenuta all'acqua (*rain screen*) con resa estetica.

Tale obiettivo si correla strettamente con i paradigmi del processo progettuale innovativo proposto dal progetto di ricerca, in quanto la progettazione dell'elemento costruttivo, oltre a soddisfare le istanze citate in precedenza, deve possedere caratteri di flessibilità e adattamento alle diverse situazioni tipologico-costruttive indicate all'interno del repertorio di soluzioni tecniche esistenti selezionate e presentate nel progetto di ricerca.

Lo studio a carattere sperimentale di questa soluzione di involucro è inteso sia a verificare le possibilità di impiego del nuovo materiale riciclato, sia alla realizzazione di un prototipo in scala per verificarne le problematiche di messa in opera e i requisiti prestazionali, in seguito alla fase di analisi termica svolta mediante software di simulazione in regime stazionario e dinamico. La fase finale di realizzazione dei prototipi rappresenta la parte essenziale del progetto di ricerca, in quanto momento di verifica reale delle formulazioni teoriche svolte su modelli virtuali, in merito alle diverse formulazioni del materiale innovativo AAM studiato e alle varie applicazioni sotto forma di intonaci geopolimerici e pannelli prefabbricati.

Le sperimentazioni e i processi di ottimizzazione della formulazione chimica del materiale consentono infatti di variare con ampio margine la densità del materiale, e di conseguenza anche la lavorabilità. Questo fattore conduce a ricadute positive in ambito applicativo: grazie a una densità sufficientemente variabile, al variare della formulazione il prodotto presenta una notevole versatilità applicativa, consentendo di essere steso come termointonaco su superfici, oppure gettato come un tradizionale conglomerato cementizio.

In vista delle differenti applicazioni costruttive del materiale, sono state inizialmente elaborate tre ipotesi progettuali per l'impiego della malta geopolimerica AAM nell'ambito della realizzazione di un sistema di involucro continuo e integrato, illustrate successivamente all'interno del seguente paragrafo.

CONCEZIONE GEOMETRICA CON SOFTWARE PARAMETRICI *RHINOCEROS+GRASSHOPPER*

Come si vede dalle soluzioni progettuali proposte e illustrate di seguito, a partire dallo studio delle forme presenti in natura, le indagini morfologiche condotte hanno portato a disegnare una maglia strutturale costituita da celle di forma esagonale. In questa geometria si avverte un grande potenziale per la modulazione delle superfici di involucro, in rapporto alla stabilità geometrica della configurazione strutturale e al grado di deformabilità e curvatura del nuovo involucro progettato “su misura”.

Le riflessioni sulle logiche geometriche, espresse nella parte introduttiva del presente capitolo, hanno condotto all’investigazione della maglia esagonale per la modulazione di una superficie piana, caratterizzata dall’assenza di vuoti interstiziali tra le celle, tramite l’utilizzo di una forma geometrica elementare. Alla luce delle notevoli proprietà fisiche e della versatilità del materiale innovativo proposto, sono state inizialmente elaborate tre ipotesi progettuali di involucro per l’impiego del materiale geopolimerico nella realizzazione di un sistema di involucro continuo.

La fase di progettazione del sistema costruttivo, all’interno del processo progettuale proposto, che a partire dal rilievo geometrico del fabbricato esistente conduce fino alla realizzazione dell’intervento di recupero dell’involucro edilizio, viene gestito mediante un software di progettazione parametrica.

Come anticipato all’interno del *Capitolo II. Processi e metodi per la riqualificazione dell’involucro*, grazie al supporto di specifici software, è possibile gestire digitalmente il passaggio che conduce dalla fase di analisi preliminare e di rilievo geometrico mediante laser scanner, all’elaborazione di un modello virtuale preciso del fabbricato.

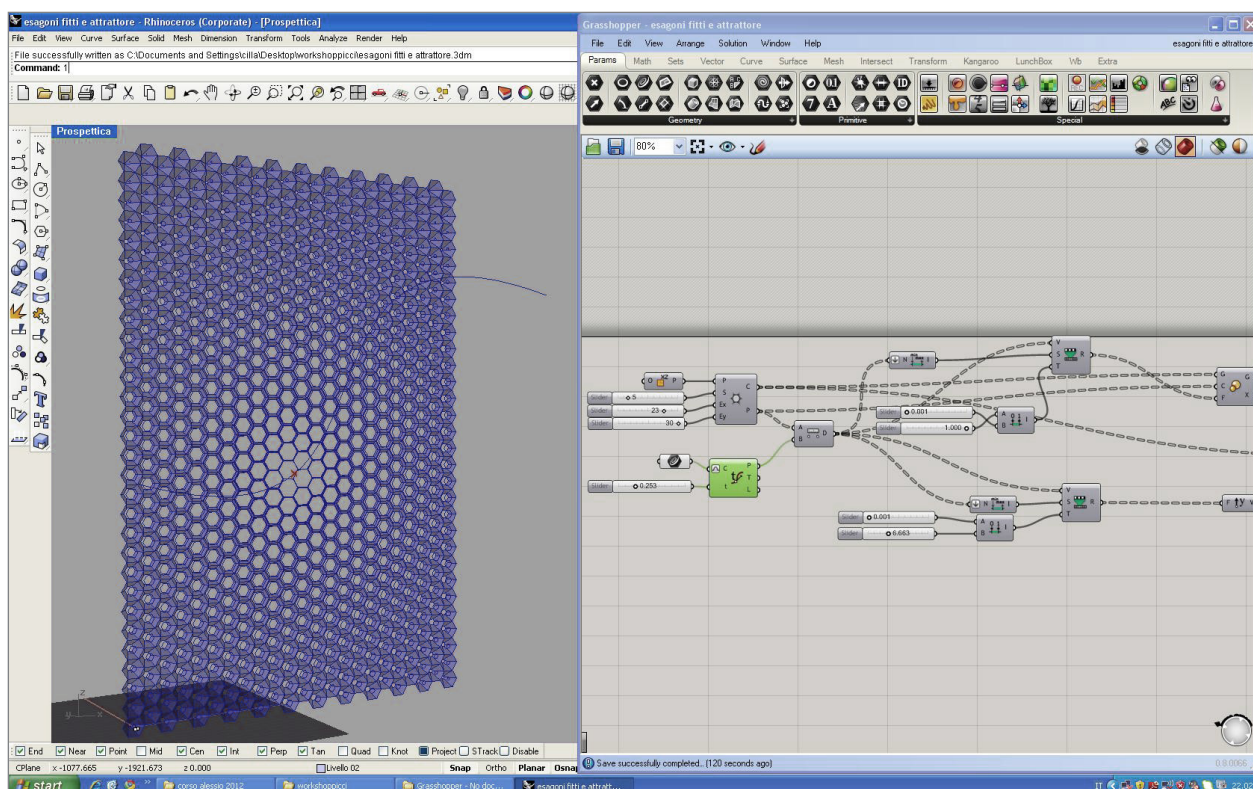
Infatti, mediante l’acquisizione del rilievo geometrico svolto con il laser scanner, si acquisisce la nuvola di punti tridimensionali che definisce la volumetria del fabbricato esistente oggetto di intervento che, nel caso specifico degli edifici scolastici prefabbricati studiati, è connotato da semplici volumetrie. Grazie all’interfaccia tra il software di rilievo e quello di modellazione, è possibile estrarre le nuvole di punti e ricavare le superfici di involucro, che rappresentano il punto di partenza per la fase di ridisegno della facciata per la sua riqualificazione architettonica ed energetica e di progettazione degli interventi “su misura”. Questa fase si avvale dell’approccio parametrico (software *Rhinoceros+Grasshopper*) per la progettazione della morfologia del secondo involucro da giustapporre alla facciata esistente degli edifici oggetto di intervento.

La possibilità offerta dal Design computazionale di modellare superfici in grado di adattarsi alla morfologia dei fabbricati esistenti, adempiendo alle prerogative di parametricità, variabilità e riproducibilità, costituisce un aspetto innovativo per la progettazione di interventi secondo tale approccio integrato, applicabile agli edifici scolastici che presentano le medesime caratteristiche architettoniche e costruttive.

Questo approccio progettuale e produttivo si basa su innovativi processi CAD-CAM applicati all'architettura: dalla definizione di un modello virtuale CAD (*Computer Aided Design*) si passa alla fabbricazione digitale CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Il modello è generato e gestito con software e tecnologie digitali CAD 3D e i parametri in ingresso regolano grandezze geometriche tra punti, linee, superfici e volumi. Oggi la disposizione di sofisticati algoritmi e software parametrici consente di concepire modelli virtuali tridimensionali capaci di guidare macchine CNC a controllo numerico, le quali permettono la produzione dei componenti di strutture, involucri, e qualsiasi parte dell'edificio.

Coerentemente con le primarie istanze del progetto di ricerca (ottimizzazione e leggerezza della struttura, minimizzazione delle risorse, rapidità e facilità di posa in opera, design architettonico), vengono approfondite le proprietà della struttura a maglia esagonale, mediante l'utilizzo di software di progettazione parametrica per il controllo degli algoritmi alla base della generazione di tali geometrie [Fig 94].

La logica alla base della progettazione parametrica può essere intesa come un sistema alternativo di design, che si serve del rigore geometrico della modellazione parametrica per configurare



[Fig. 94] Stampa video del processo di progettazione parametrica con il software *Rhinoceros+Grasshopper*: fissato un punto “attrattore” (croce verde) lungo la linea curva (rossa) definita dall’utente, l’algoritmo impone che l’ampiezza di ogni singola cella della maglia esagonale sia direttamente proporzionale alla sua distanza dall’attrattore.

gli elementi costruttivi e, successivamente, integrare i vincoli di produzione, le logiche di montaggio e le caratteristiche dei materiali nella definizione di componenti semplici. Questo approccio utilizza l'esplorazione delle variabili parametriche per comprendere il comportamento di un sistema e, a partire da questa conoscenza, elaborare strategie di risposta del sistema alle condizioni ambientali esterne. Attraverso questi strumenti informatici, oggi è possibile creare digitalmente un modello, dal quale generare infinite varianti di progetto, regolando parametri di base. Per integrare le proprietà dei sistemi, è fondamentale introdurre dati di input relativi ai materiali, e strutturare vincoli di fabbricazione e di assemblaggio in una logica parametrica: si tratta dunque di un approccio che permette il riconoscimento di modelli di comportamento geometrici, delle relative capacità performative e tendenze del sistema.

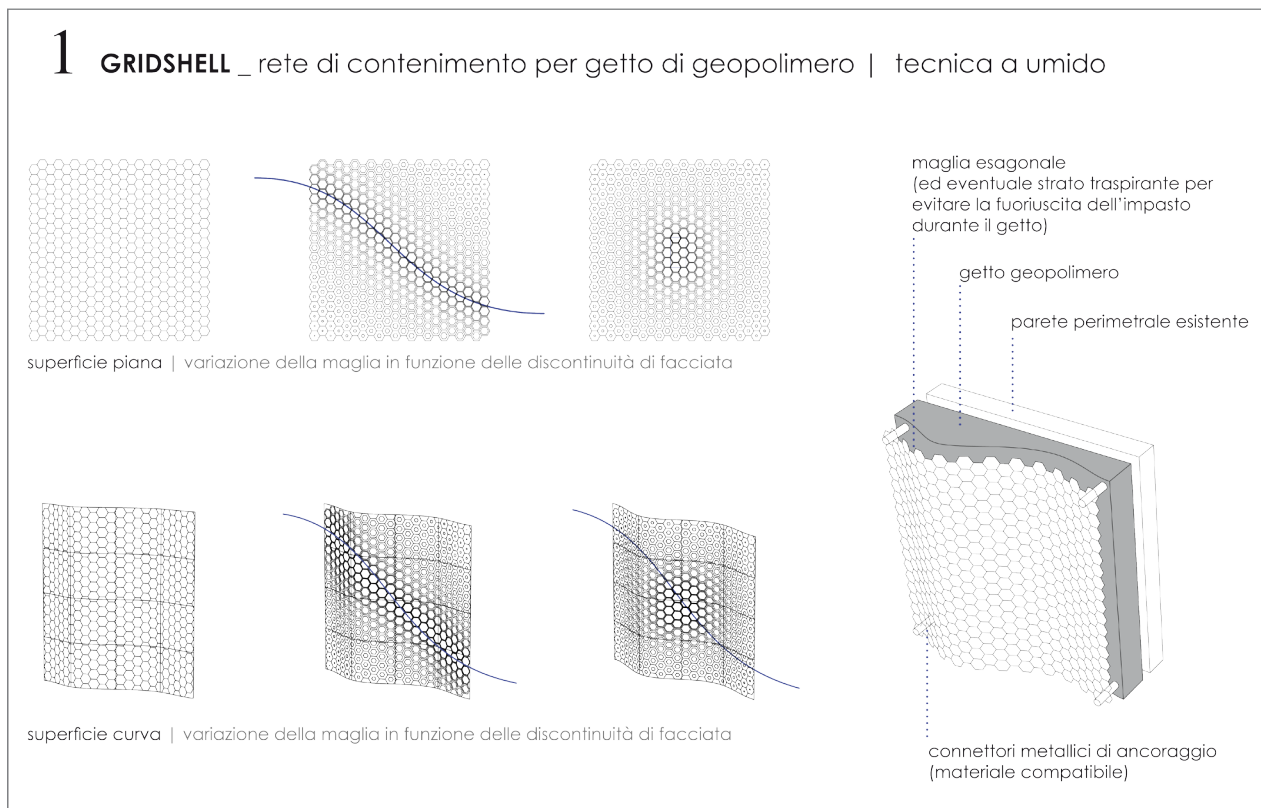
In linea con questo approccio parametrico, la progettazione della nuova superficie di involucro si ispira ai principi di variabilità, flessibilità e adattabilità del sistema modulare esagonale di base, in funzione delle effettive caratteristiche geometriche e fisiche della facciata esistente, e delle particolari discontinuità, precedentemente rilevate.

Secondo una visione dell'involucro architettonico inteso come superficie unitaria avvolgente, mediante l'approccio progettuale innovativo proposto si vuole giungere alla progettazione di un rivestimento architettonico dal comportamento "dinamico", in cui la geometria e la composizione costruttiva risultino i primari oggetti di interesse.

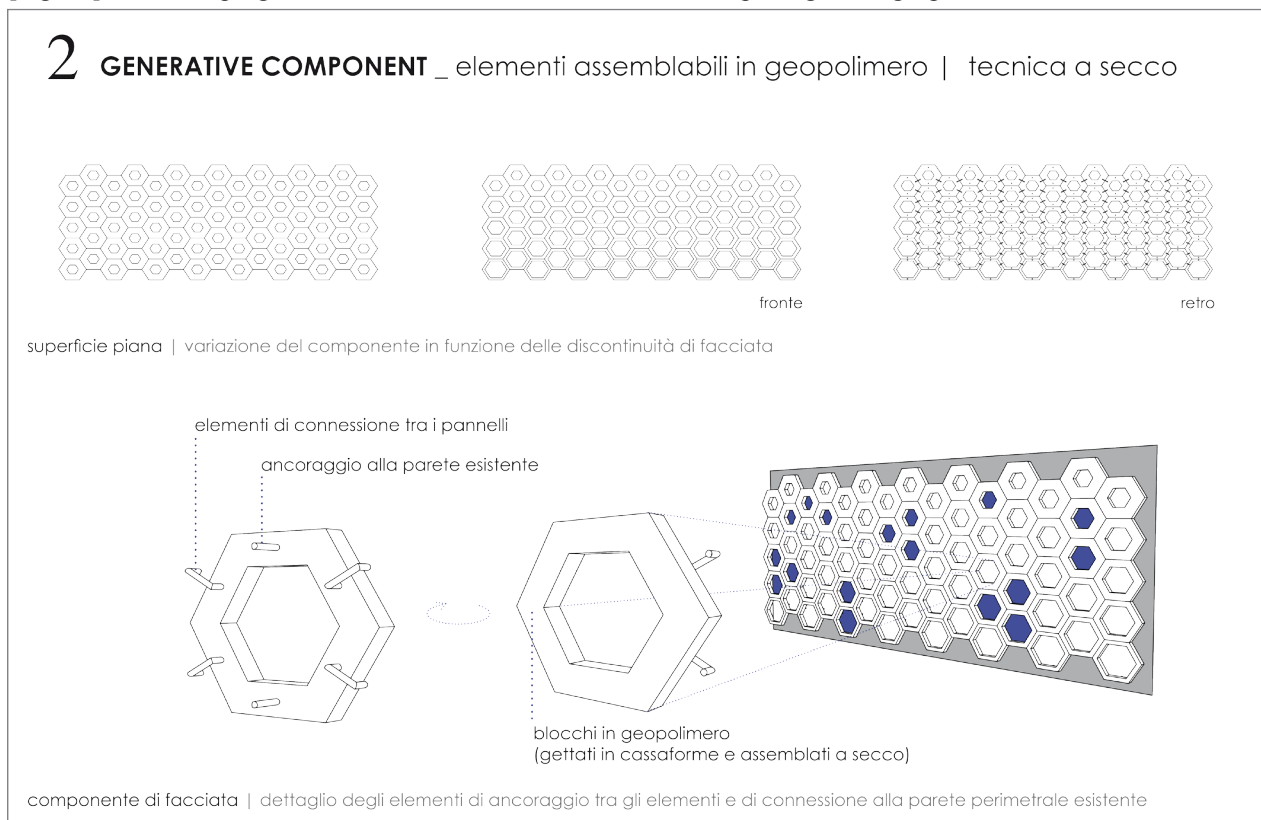
Pertanto, il progetto di ricerca è volto all'elaborazione di una metodologia progettuale basata su uno studio parametrico di morfologia e configurazioni aggregative per una ricerca performativa a livello di componente locale e di gruppo. Al fine di ottenere un dinamismo che emerga da uno studio puntuale e che tenga conto della globalità delle relazioni, la ricerca si basa sulla possibilità di elaborare disegni e modelli agendo direttamente sulla geometria, mediante l'applicazione di regole e l'acquisizione di relazioni tra elementi di costruzione, o mediante la definizione di forme e algoritmi.

L'aggregazione di questi moduli, mediante particolari sistemi di assemblaggio, è finalizzata alla realizzazione di un involucro che, analizzato localmente in ogni suo punto, risulti variato per composizione dei materiali e dimensioni, secondo una distribuzione disomogenea dettata da fattori energetici e costruttivi. Per la progettazione di un involucro edilizio dotato di queste proprietà, è indispensabile ricorrere all'assistenza di software per la modellazione delle superfici e degli elementi, che sia in grado di interfacciarsi con macchine per la produzione industrializzata degli elementi costruttivi.

Le soluzioni progettuali illustrate di seguito si basano sul principio di involucro a comportamento "dinamico", definito da una stratificazione di materiali che per composizione, dimensionamento, e relative variazioni delle proprietà e dei principi di sostenibilità che li identificano, possano prefigurare soluzioni costruttive di miglioramento energetico di un edificio esistente.



[Fig. 95] Soluzione progettuale n. 1: *Gridshell*, rete di contenimento per il getto di geopolimero AAM.



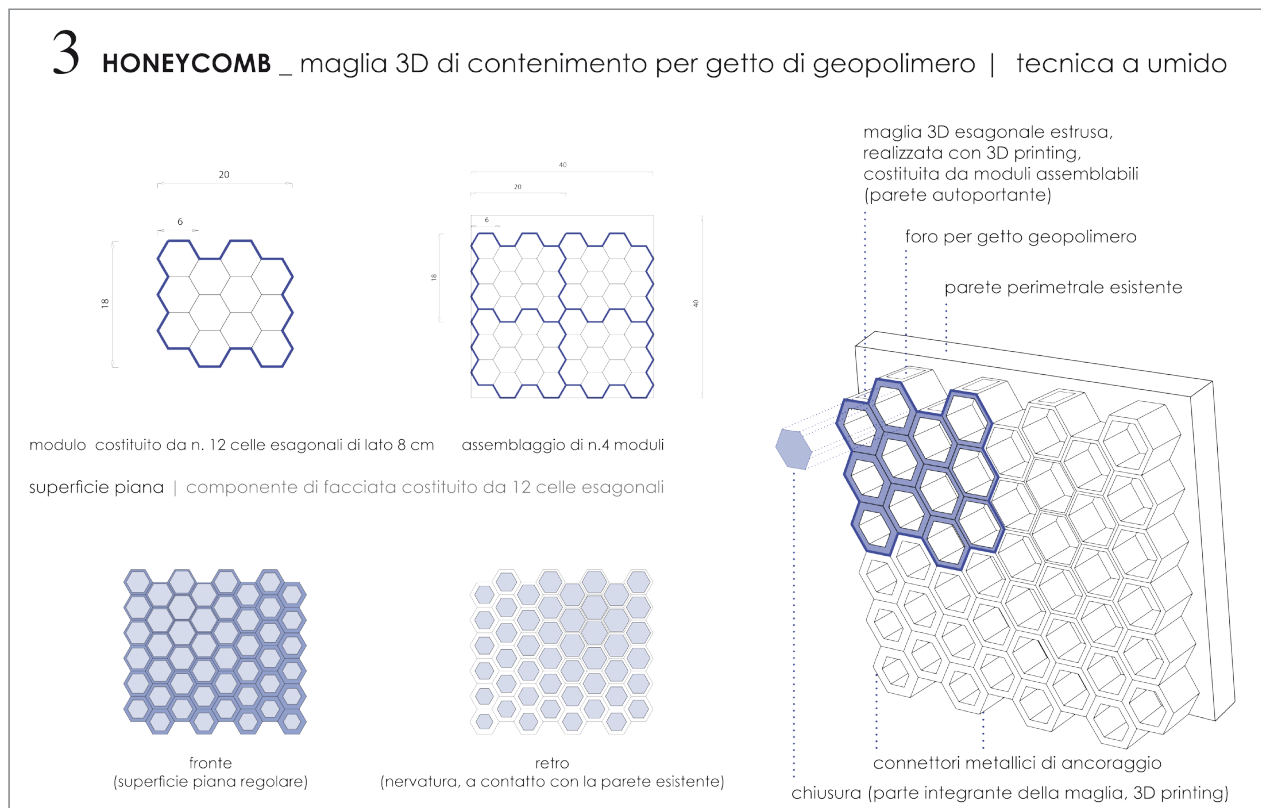
[Fig. 96] Soluzione progettuale n. 2: *Generative component*, elementi assemblabili in geopolimero AAM.

La prima soluzione progettuale proposta [Fig. 95], chiamata *Gridshell*, propone l'utilizzo di una tecnica costruttiva a umido, che consente di realizzare una seconda pelle continua, costituita da uno strato di materiale plastico AAM gettato direttamente in opera, come materiale termicamente isolante. Per evitare la fuoriuscita della pasta è prevista la posa di una maglia esagonale, dal duplice ruolo di supporto e contenimento, adeguatamente ancorata alla facciata esistente. Per le proprietà già enunciate delle superfici tassellate secondo un pattern esagonale, è possibile ottenere una superficie planare o curva, la cui geometria sia variabile in funzione delle discontinuità della facciata. Oltre alla possibilità offerta di adattarsi meglio all'eterogeneità volumetrica degli edifici esistenti, l'impiego di una maglia così concepita consente di variare localmente lo spessore dello strato isolante, in funzione delle esigenze di isolamento dell'edificio, in relazione all'orientamento e alla distribuzione interna dei locali. L'intero sistema è ancorato puntualmente alla facciata esistente tramite un sistema di fissaggio meccanico, costituito da connettori di materiale compatibile con il materiale geopolimerico.

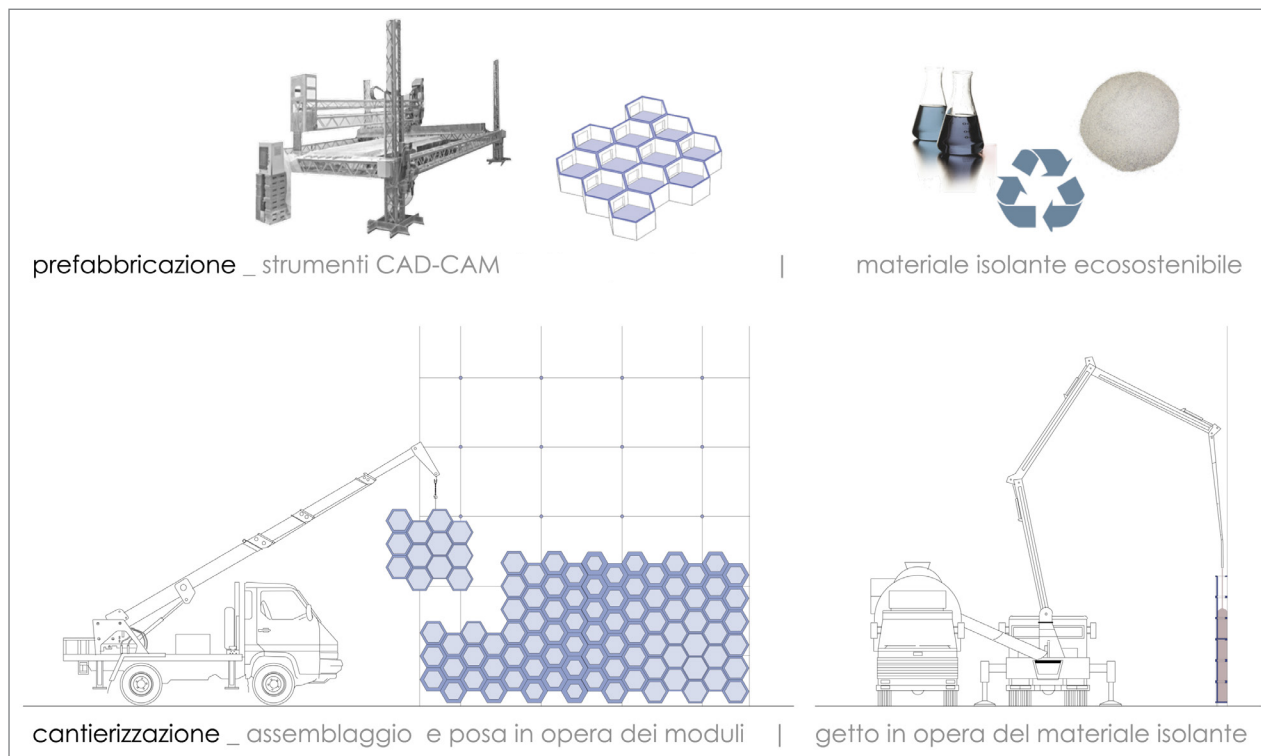
La seconda soluzione proposta [Fig. 96], denominata *Generative component*, consiste invece nell'applicazione di una tecnica a secco, che concepisce la seconda pelle come un sistema derivato dall'assemblaggio di elementi prefabbricati in materiale geopolimero isolante. Il modulo di base del sistema (*generative component*) presenta una forma esagonale, dotata di una foratura concentrica, di dimensioni variabili in funzione della necessità di protezione e oscuramento dalla radiazione solare, sempre in accordo con l'orientamento e l'articolazione spaziale interna. In linea generale, il modello prevede un complesso sistema meccanico di connessione reciproca tra le celle esagonali e, al contempo, di ancoraggio del nuovo involucro alla facciata esistente. Attraverso l'impiego di tale sistema costruttivo, si tende ad intervenire sull'involucro esistente al fine di migliorarne tanto le prestazioni energetiche quanto il comportamento meccanico, grazie a una maglia capace di assorbire le sollecitazioni orizzontali esterne.

Infine, la terza soluzione [Fig. 97], denominata *Honeycomb*, propone un sistema più articolato, che prevede la combinazione della tecnica di prefabbricazione per la realizzazione di una struttura resistente, con la tecnica a umido per il getto in opera del materiale isolante, ad essa integrato. Il sistema è costituito da una struttura a maglia esagonale (*honeycomb pattern*), ottenuta dall'assemblaggio di pannelli modulari in materiale composito riciclato (quali la fibra di vetro), incastrati tra loro grazie alla particolare geometria che caratterizza i loro bordi. Questi pannelli, ancorati puntualmente alla facciata esistente, costituiscono una struttura dal duplice ruolo di cassaforma a perdere per il contenimento della malta isolante AAM, e di miglioramento della resistenza a flessione e compressione dell'involucro, grazie alla rigidità per forma conferita dalla struttura a nido d'ape.

Ognuno di questi pannelli di grande formato, realizzato interamente in materiale termoplastico stampato mediante processo di *3D Printing*, comprende un elemento di rivestimento esterno



[Fig. 97] Soluzione progettuale n. 3: *Honeycomb*, maglia tridimensionale strutturale di contenimento del getto geopolimerico AAM.



[Fig. 98] Simulazione del processo di produzione e messa in opera del sistema costruttivo.

e protezione dalla pioggia accoppiato allo strato isolante, realizzato con lo stesso materiale leggero e resistente.

Nell'ottica di elaborare un metodo di progettazione integrata dei sistemi di involucro, la ricerca propone l'utilizzo dei software di progettazione parametrica per il disegno di questa seconda pelle in grado di adattarsi alla volumetria esistente, rispondendo efficientemente ai requisiti imposti dalle attuali normative e dalle esigenze dell'utenza. Tale paradigma di ricerca ha condotto alla previsione di una maglia esagonale per il rivestimento esterno, variabile in funzione dell'orientamento dell'edificio oggetto di intervento, della composizione muraria delle differenti pareti perimetrali, della distribuzione spaziale interna e delle esigenze di isolamento termico e auto-ombreggiamento della facciata.

Dopo aver valutato le potenzialità architettoniche e costruttive della terza soluzione progettuale [Fig. 98], durante la prima fase di studio e progettazione si è avvertita la necessità di sviluppare una prima prototipazione in scala 1:5 dei componenti di facciata, per esplorare le possibilità offerte dalle tecnologie CAD-CAM². Questa prima prototipazione rapida viene riportata di seguito, all'interno del paragrafo dedicato appositamente all'illustrazione della sperimentazione costruttiva.

L'esito più rilevante della prima fase progettuale consiste inevitabilmente nella comprensione e individuazione dei fattori critici e delle potenzialità presenti nelle idee proposte, al fine di focalizzare le ricerche verso una soluzione in grado di adempiere adeguatamente alle istanze di ricerca. Nell'ottica di riqualificare il costruito mediante interventi di recupero che agiscano nel rispetto dei criteri sopra enunciati, il terzo sistema costruttivo, inizialmente scelto e approfondito attraverso la prototipazione (*Honeycomb*), presenta infatti alcune importanti proprietà, a fronte di qualche innegabile debolezza tecnica e costruttiva.

L'utilizzo del materiale plastico AAM come elemento termicamente isolante, sotto forma di pasta gettata in opera all'interno della struttura prefabbricata, porta a rinunciare all'impiego di una tecnica interamente a secco, promuovendo una tecnica mista. In un'ottica ecosostenibile, le tecniche a secco presentano una alternativa efficace ai sistemi costruttivi tradizionali a umido, in quanto consentono l'impiego di elementi prefabbricati da assemblare in cantiere, senza sporcare né inquinare durante la fase di posa in opera (a fronte comunque della produzione di energia grigia).

D'altro canto, in merito alle prerogative di riduzione dell'emissione di CO₂ durante la fase di prefabbricazione, il materiale termicamente isolante proposto presenta un grande potenziale, in quanto è costituito per il 90% da polvere di laterizio derivante da scarti di lavorazione (che dunque hanno già subito il processo di cottura ad alte temperature). Inoltre, questa polvere ceramica è combinata con una soluzione in grado di avviare il processo di attivazione alcalina a temperatura

2 Mazzoli C., Fusco O., Guardigli L., Gulli R., *Innovative materials and technologies for a new envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock*, in "CESB13 - Central Europe towards Sustainable Building 2013, 26th-28th June 2013, Prague, Czech Republic, Proceedings", Tiskarna PBtisk, Praga, giugno 2013, pp. 405-408.

ambiente, evitando di dover raggiungere le alte temperature normalmente richieste, e riducendo così notevolmente l'impatto ambientale dell'intervento.

L'ecosostenibilità di un sistema costruttivo, però, non coinvolge soltanto il suo impatto ambientale durante le fasi di realizzazione ma, in un'ottica più ampia, consiste nell'ottimizzazione del rapporto tra produzione, costruzione, funzionamento, mantenimento e dismissione. Tra i vantaggi delle tecniche costruttive a secco, infatti, compare la reversibilità e la capacità di recuperare gli elementi, per riutilizzarli o riciclarli grazie alla possibilità di concludere il loro ciclo di vita con uno smaltimento differenziato.

Una progettazione sostenibile deve considerare approfonditamente anche le operazioni che gli elementi costruttivi dovranno subire alla fine del loro ciclo di vita: risulta così fondamentale prestare attenzione alla fase di concezione delle modalità di connessione e sconnessione di ogni elemento tecnico, in termini di smontabilità, accessibilità e rapidità, ed eventuale recuperabilità o reimpiego.

Infine, tra i vantaggi presentati dalle tecniche costruttive prefabbricate, emerge la possibilità di dotare gli elementi costruttivi da assemblare a secco di una particolare modularità, combinata con la facilità e la rapidità di messa in opera.

L'insieme di queste riflessioni ha portato a svolgere una analisi geometrica degli edifici scolastici oggetto di studio, peraltro già regolati da una modularità dettata dall'impiego delle tecniche prefabbricate per la realizzazione delle strutture portanti e dei pannelli di tamponamento in conglomerato cementizio armato: tale analisi ha condotto all'individuazione di moduli di base che consentono di tassellare in maniera continua l'intera superficie di involucro degli edifici esistenti.

Tutte queste considerazioni hanno indirizzato le ricerche verso l'elaborazione di un altro sistema costruttivo interamente a secco che, in definitiva, riesca ad adempiere a tutte le funzioni richieste nel rispetto dei principi di sostenibilità, intesa come reversibilità, flessibilità, recupero e riutilizzo di tecniche e materiali a bassa emissione di biossido di carbonio.

STRATIFICAZIONE DEL SISTEMA DI INVOLUCRO *G-SKINNED*

La soluzione progettuale definitiva per il sistema di involucro *G-SKINNED* rappresenta un'evoluzione della terza soluzione proposta (*Honeycomb*), alla quale sono state apportate diverse modifiche e integrati diversi dispositivi. Come anticipato, il sistema *G-SKINNED* è costituito da pannelli prefabbricati, composti da una struttura a trama esagonale, realizzati con macchine CNC e *3D Printer* per la stampa di modelli digitali CAD, elaborati mediante software di progettazione parametrica.

Ogni pannello prefabbricato a trama esagonale estrusa presenta il duplice ruolo di conferire rigidità per forma e di fungere da cassaforma a perdere per contenere il getto di materiale isolante plastico, effettuato durante la fase pre-cantiere. Pertanto, risulta importante che esso sia realizzato con un materiale che presenti i requisiti di leggerezza e resistenza e che sia ancorato alla parete perimetrale esistente mediante un sistema di ancoraggio meccanico puntuale idoneo, in relazione alle sollecitazioni esterne a cui sono normalmente esposte le facciate degli edifici. Inoltre, trattandosi di un componente di facciata a geometria complessa, risulta importante che esso sia realizzato in materiale termoplastico, stampabile mediante le moderne tecnologie di *3D Printing* che consentono la produzione rapida serializzata delle geometrie precedentemente elaborate con programmi di modellazione tridimensionale parametrica.

In seguito a queste considerazioni, si sceglie di realizzare questo componente edile in materiale polimerico, dotato di elevata leggerezza, resistenza per forma, durabilità e riciclabilità. In particolare, futuri sviluppi di ricerca individuano l'eventuale inserimento del prodotto all'interno di una filiera di riciclo e riutilizzo di materiale plastico tradizionalmente impiegato per i rivestimenti edili o per altri impieghi al di fuori del campo della costruzione.

Durante la fase di progettazione parametrica della soluzione costruttiva di involucro da giustapporre alla facciata esistente, viene elaborato un disegno della superficie connotato da una tassellazione esagonale dello spazio, mediante un numero finito di moduli [Fig. 101].

Le dimensioni dei moduli e la variabilità della maglia per ognuno di essi vengono definite a partire dal rilievo geometrico del fabbricato oggetto di intervento, grazie all'acquisizione della nuvola di punti 3D fornita dalla primaria fase di rilievo con laser scanner, da cui si ricavano le dimensioni precise della superficie di involucro. Grazie al controllo della geometria, reso possibile dagli strumenti di modellazione parametrica, si procede alla suddivisione in un numero limitato di moduli, da assemblare secondo i principi di variabilità e adattabilità sopra esposti.

Secondo il processo progettuale innovativo proposto dalla ricerca, che a partire dal rilievo geometrico dell'edificio esistente conduce alla progettazione parametrica dell'intervento di riqualificazione dell'involucro e alla successiva prefabbricazione degli elementi, si prevede l'utilizzo della stampante 3D per produrre questo numero limitato di moduli corrispondenti ai componenti

G-SKinnED

Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design

Sezione verticale

Ancoraggio meccanico puntuale

Ancoranti metallici (tipo Fisher FAZ II 10/10)
di ancoraggio alla facciata esistente

Honeycomb

Pannello prefabbricato in polimero accoppiato
isolante / rivestimento a trama esagonale
(realizzato con unica stampa, mediante 3D Printer)
dotato di alette perimetrali per l'ancoraggio
e distanziatori per camera di microventilazione

Rivestimento "attivo"

Strato di vernice termocromica ($s = 1 \text{ cm}$)

Inverno:

colorazione scura - accumulo energia solare

Estate:

colorazione chiara - riflessione della radiazione solare

Dispositivo di auto-ombreggiamento

integrato del componente di facciata
di profondità variabile di 4-6-8-10 cm

Camera di microventilazione

integrata nel componente di facciata ($s = 4 \text{ cm}$)

Malta AAM a base ceramica

Materiale isolante ottenuta da scarti di produzione

Contenuti della malta:

- polvere di laterizio

- sabbia normalizzata UNI EN 196-1

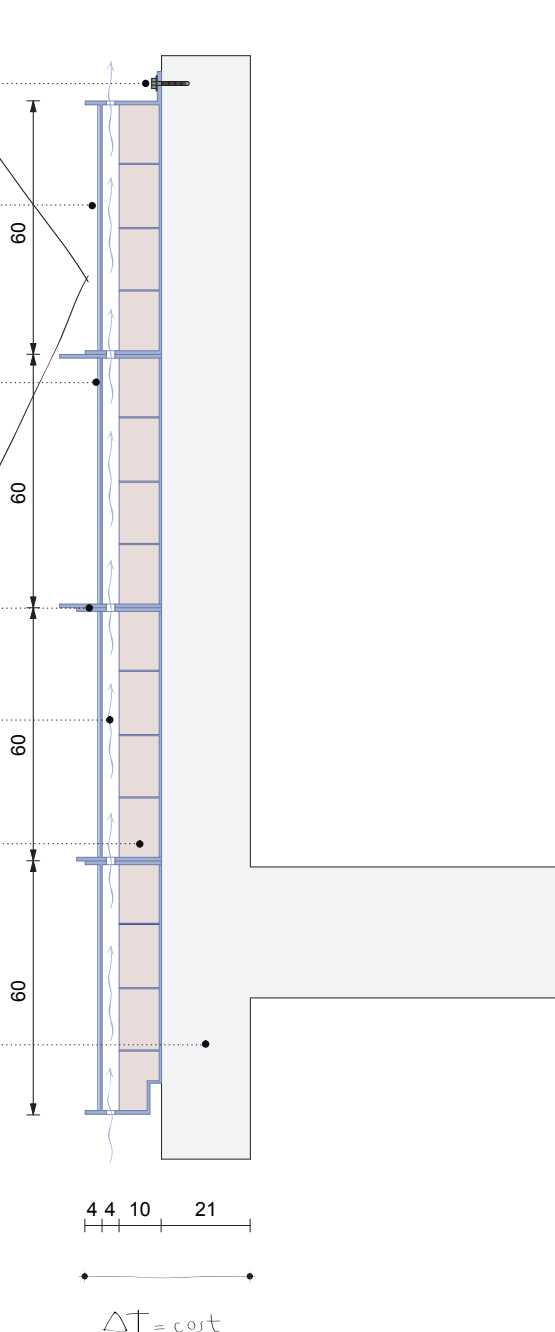
- soluzione alcalina

- agenti aeranti

Facciata esistente

Patrimonio edilizio recente 1960-80

Pannelli prefabbricati in c.a.



[Fig. 99] Sezione verticale del sistema di involucro proposto G-SKinnED.

di facciata.

In particolare, in funzione delle specificità e delle finalità dell'intervento di recupero, si prevede di impiegare la tecnologia del *3D Printing* per stampare direttamente i componenti di facciata mediante un processo di deposito di materiale termoplastico a indurimento rapido, attualmente già utilizzato per la stampa 3D: si tratta di materiali polimerici, quali PLA, ABS, PC, PET.

Come si vede dalle immagini [Fig. 99-100], il pannello progettato è dotato di una geometria complessa e viene realizzato mediante l'utilizzo di macchine CNC e *3D Printer* per la stampa di modelli digitali CAD, elaborati precedentemente grazie a software di progettazione parametrica. Grazie a questa tecnologia, è possibile dotare il pannello di una apposita geometria e sagomatura, tale da comprendere un'intercapedine interposta fra lo strato isolante e lo strato ultimo di rivestimento, dal ruolo di microcamera di ventilazione: i benefici apportati da questa lamina d'aria sono molteplici, in termini di traspirabilità del muro, evaporazione della condensa interstiziale e dunque di benessere termoigrometrico all'interno dell'edificio.

Ogni pannello accoppiato di isolante e strato di rivestimento presenta una dimensione di 260x230 cm circa, per una profondità totale di circa 15 cm, ed è costituito da dodici o sedici celle esagonali, definite da nervature di profondità variabile in funzione della geometria elaborata con il software di progettazione parametrica, sulla base delle esigenze locali geometriche e di auto-ombreggiamento. Infatti, la struttura esagonale progettata presenta nervature a nido d'ape sporgenti dal piano di facciata con lunghezze variabili, fornendo un sistema di auto-ombreggiamento dei componenti di facciata variabile durante le ore del giorno e durante le stagioni estive e invernali.

Il pannello conformato comprende una microcamera di ventilazione fra lo strato coibente in AAM e lo strato di rivestimento esterno in materiale plastico, al fine di garantire una adeguata traspirabilità del materiale isolante, per evitare la formazione di condensa: tale intercapedine viene progettata in fase di modellazione del pannello e, pertanto, viene realizzata durante la stampa unica del componente modulare di facciata mediante *3D Printing* a deposito di materiale³.

Inoltre, ogni pannello prefabbricato è dotato di apposite alette a L a scomparsa e, una volta posato in opera e assemblato al sistema, viene connesso alla facciata esistente mediante ancoranti in acciaio⁴ appositi per i supporti in calcestruzzo fessurato e per applicazioni sismiche. La singolare geometria esagonale del pannello offre la possibilità di ottenere un particolare sistema di incastro tra i pannelli e, dunque, una riduzione dei sistemi di connessione tra i componenti e tra i pannelli stessi e la facciata esistente, con conseguenze benefiche anche in termini di riduzione dei ponti termici e di discontinuità.

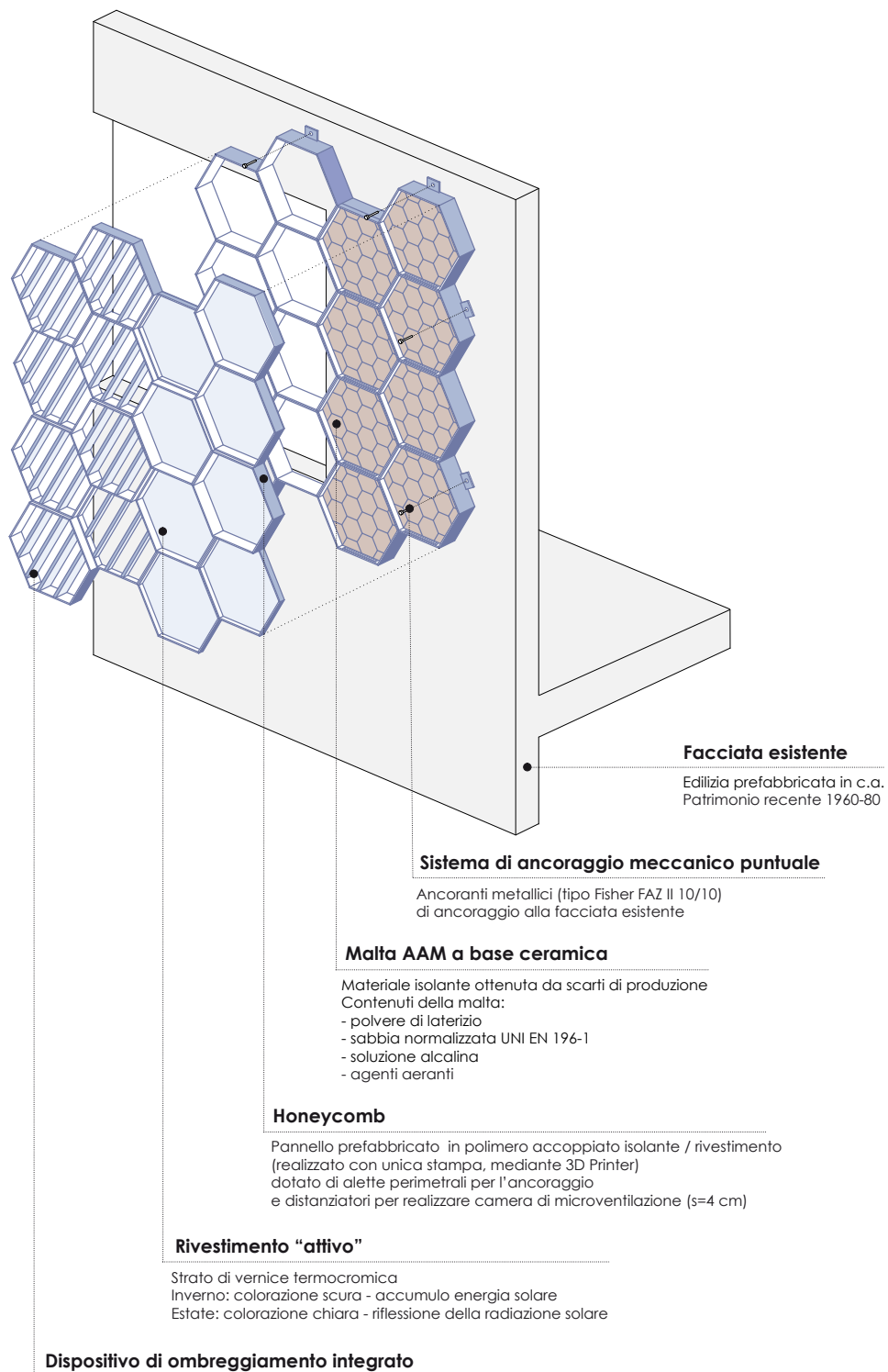
³ I materiali polimerici termoplastici maggiormente utilizzati per il *3D Printing* sono i seguenti: PLA (acido polilattico), ABS (Acrilnitrile-Butadiene-Stirene), PCL o PLC (Policaprolattone).

⁴ È importante rilevare che l'unico materiale incompatibile chimicamente con l'AAM risulta essere l'alluminio che, se posto a diretto contatto con la malta geopolimerica a base ceramica studiata, porterebbe a un processo accelerato di ossidazione del materiale, con conseguente formazione di fessurazioni.

G-SKinnED

Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design

Esploso



[Fig. 100] Esploso verticale del sistema di involucro proposto G-SKinnED.

In fase di produzione, successivamente alla stampa 3D dei componenti edili in materiale plastico, all'interno di questa struttura resistente viene eseguito il getto di materiale termico isolante. La sostenibilità del sistema di involucro consiste in particolar modo nell'impiego di questo materiale isolante geopolimerico innovativo, inorganico ed ecosostenibile, chiamato *AAM - Alkali Activated Material*, ottenuto dal riciclo di polveri derivate da scarti di produzione del laterizio, attivate alcalinamente a temperatura ambiente, dunque con ridotto impatto ambientale.

Dal punto di vista chimico, un materiale geopolimerico è un materiale ottenuto mediante l'attivazione di una reazione chimica tra la polvere di un alluminosilicato e una soluzione silicatica alcalina basata su tre passaggi principali⁵: la dissoluzione degli atomi di Silicio e Alluminio presenti all'interno della materia prima (in genere metacaolino); la riorientazione degli ioni in soluzione; infine l'innescamento delle reazioni di policondensazione che portano allo sviluppo di polimeri inorganici.

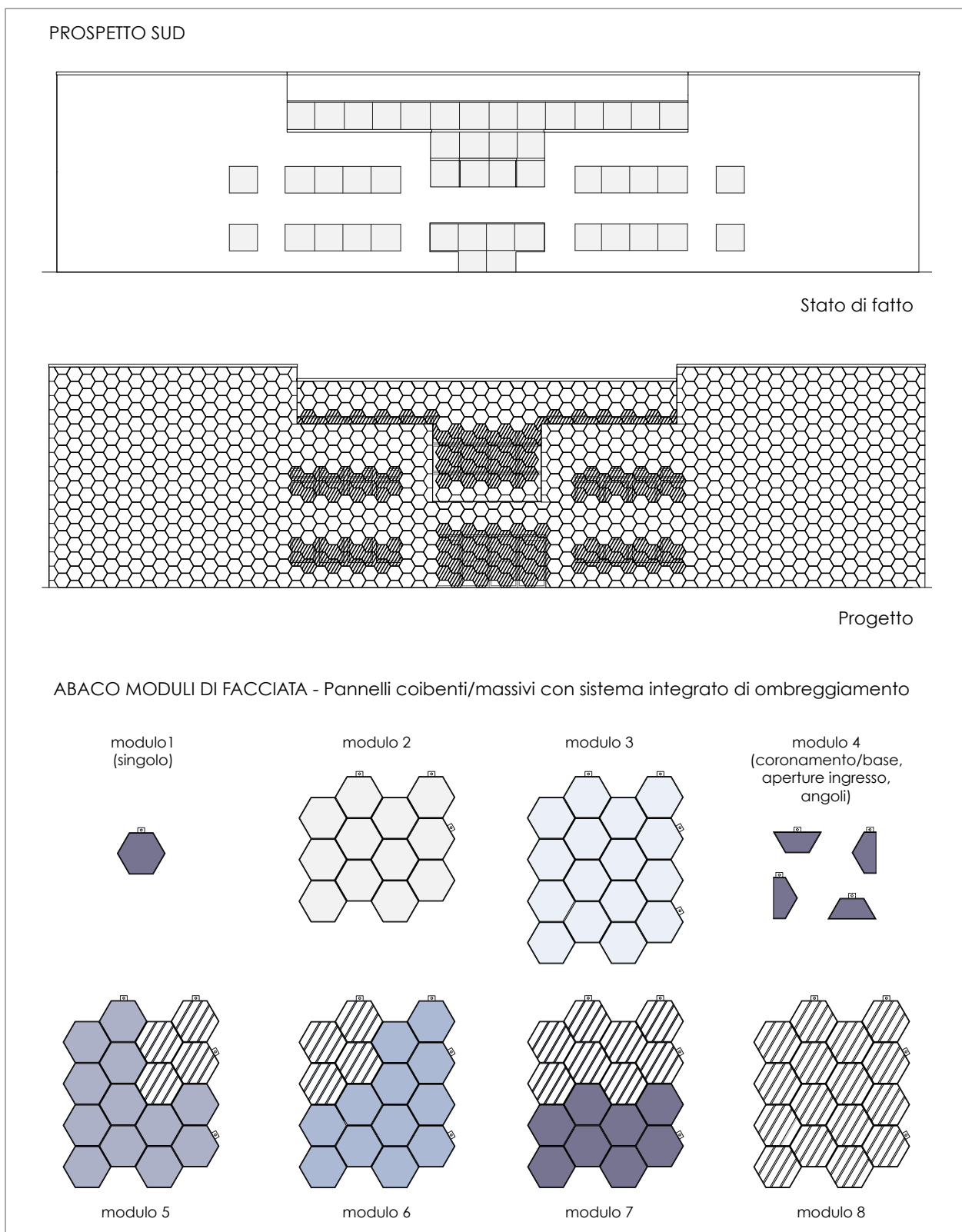
Il primo aspetto innovativo che caratterizza questo studio consiste nell'utilizzo dello scarto di laterizio polverizzato come materia prima, al posto del comune metacaolino, da attivare tramite soluzione alcalina. Mediante questo processo, si ottiene un materiale composto principalmente da materia riciclata, e in piccola parte da attivanti alcalini a bassissimo costo. La formulazione di questo nuovo impasto di riciclo a base geopolimerica presenta quindi delle caratteristiche innovative in relazione sia alla produzione, che alla sua applicabilità in diversi settori.

Inoltre, un ulteriore aspetto innovativo in ambito di ecosostenibilità riguarda la temperatura a cui avviene il processo di attivazione alcalina. I prodotti a base geopolimerica fino ad oggi studiati, nella maggior parte dei casi, necessitano di una temperatura maggiore di quella ambiente, comportando così un incremento notevole dei costi di produzione e delle emissioni di CO₂ al punto tale da non poter essere considerati come prodotti ecosostenibili, nonostante le loro elevate prestazioni fisico-meccaniche.

Per questo motivo, una delle condizioni necessarie all'avanzamento della ricerca è stata fin da subito quella di mantenere la temperatura di essiccamento equivalente a quella ambientale. Durante le ricerche, si è proceduto a raffinare le formulazioni, in particolare migliorando il numero di moli di ossidi metallici presenti all'interno del composto, giungendo così a un prodotto avente proprietà elevate in rapporto all'applicazione prevista.

Una delle proprietà più innovative di questo prodotto riguarda la notevole riduzione delle emissioni di anidride carbonica, dovuta sia allo svolgimento a temperatura ambiente della produzione e dell'essiccamento del getto, sia all'eliminazione della produzione di CO₂ legata alla calcinazione del caolino, grazie all'utilizzo di una materia prima che ha già subito il processo di cottura.

5 Abdullah M. M. A., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K. N., Ibrahim W. M. W., *Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement - A Review*, in "International Journal of Pure & Applied Sciences & Technology", September 2011, Vol. 6, Issue 1, p. 35.



[Fig. 101] Rappresentazione del prospetto finale della Scuola Media Dozza, secondo l'ipotesi progettuale di recupero dell'involucro edilizio mediante il sistema costruttivo *G-SKinnED*; abaco degli n. 8 moduli di pannello prefabbricato a trama esagonale da assemblare in opera per realizzare la seconda pelle isolante e massiva del fabbricato.

Pur appartenente allo stesso componente edilizio, la trama esagonale della struttura costituente lo strato coibente si differenzia da quella esterna di rivestimento: tale variazione deriva da una differente funzione della struttura esagonale per i due strati che collaborano alla realizzazione del componente di facciata.

La struttura sottostante, adiacente alla facciata esistente del fabbricato, presenta una maglia esagonale maggiormente fitta (esagoni di lato pari a 8,6 cm), in quanto la sua duplice funzione consiste non solo nel contenimento della malta isolante durante la fase pre-cantiere (cassaforma a perdere), bensì anche nel conferimento di rigidità per forma al pannello coibente, costituito da uno strato di 10 cm di materiale isolante AAM.

La struttura più esterna di rivestimento, invece, presenta una maglia esagonale maggiormente larga (esagoni di lato pari a 34,5 cm), in quanto il suo duplice ruolo risponde alla necessità di supporto per la stesura della vernice termocromica su porzioni sufficientemente estese e di sistema integrato di nervature esterne per la protezione agli agenti atmosferici e l'auto-ombreggiamento dei componenti di facciata. Pertanto, lo strato di finitura ultima del pacchetto costruttivo murario funge non soltanto da strato di protezione dagli agenti atmosferici per l'isolante termico, bensì anche da struttura resistente a cui integrare dispositivi di ombreggiamento.

Il sistema studiato, grazie alla struttura esagonale modellata parametricamente in funzione delle specificità dell'edificio esistente, consente di progettare la superficie di involucro prevedendo la predisposizione di celle piene coibenti, in corrispondenza delle porzioni opache, affiancate a celle leggere schermanti, in corrispondenza delle finestrate. Il pannello di facciata, infatti, funge sia da elemento di protezione dell'isolante dagli agenti atmosferici in corrispondenza delle porzioni opache di facciata, sia da dispositivo integrato di schermatura della radiazione in corrispondenza delle porzioni finestrate di involucro che, secondo una approfondita analisi solare, necessitano di ombreggiamento per un corretto svolgimento delle attività scolastiche, specialmente durante la mattina.

Inoltre, si prevede il trattamento delle celle esagonali opache secondo uno strato di rivestimento realizzato mediante una vernice termocromica innovativa per esterni, dotata di notevoli potenzialità fisiche e ottiche, volta a conferire un comportamento "attivo" all'involucro.

Tra le numerose proprietà che, con sempre maggiore frequenza, vengono richieste ai ricercatori che si occupano di tecnologia dei materiali, particolare attenzione è rivolta alle caratteristiche di trasformabilità e flessibilità, ossia alla capacità di modificare le proprietà in funzione delle sollecitazioni esterne, per adattarsi al contesto.

Alla luce di queste esigenze, si osserva che tra i materiali innovativi a comportamento dinamico utilizzabili in architettura, al fine di minimizzare il consumo energetico, rivestono un importante ruolo i materiali cromogenici, caratterizzati dalla capacità di modificare le loro proprietà ottiche in modo reversibile, in funzione delle condizioni climatiche esterne (temperatura e luce) e

delle esigenze funzionali interne (applicazione di differenza di potenziale elettrica).

Basati sull'impiego di materiali dotati di queste proprietà fisico-chimiche, i dispositivi cromogenici sono in grado di cambiare di stato, passando da una colorazione altamente trasmittente della radiazione solare (trasparente), a una parzialmente trasmittente (traslucida), fino a una scarsamente trasmittente (semiopaca).

I dispositivi cromogenici si suddividono in due categorie: quelli "attivabili", regolabili esternamente dagli utenti tramite alimentazione elettrica, e quelli "adattivi", autoregolabili tramite lo sfruttamento dell'incidenza dell'energia solare sulla superficie di involucro. All'interno della prima categoria di materiali attivabili elettronicamente, i materiali più comuni sono i dispositivi elettrocromici e i cristalli liquidi. Alla seconda categoria di materiali autoregolanti appartengono invece i dispositivi fotocromici e termocromici, ancora in piena fase di studio e sperimentazione, sui quali le ricerche finora condotte hanno portato buoni risultati.

Come suggerisce il termine, i dispositivi fotocromici sono in grado di variare le loro caratteristiche ottiche in funzione della loro esposizione ai raggi ultravioletti solari, assumendo un inscurimento della colorazione direttamente proporzionale all'intensità della radiazione.

I dispositivi termocromici, invece, variano le proprie caratteristiche ottiche in funzione della loro temperatura, diventando maggiormente opachi all'aumentare della temperatura. Se usati nel settore edile, questi dispositivi devono essere in grado di innescare il fenomeno di trasformazione di stato sotto determinate condizioni, ossia all'interno dell'intervallo di benessere termico e visivo dell'uomo.

I materiali fotocromici si suddividono in organici (idrocarburi aromatici) e inorganici (Solfuro di Zinco ZnS, Biossido di Titanio TiO₂, Nitrato di Litio Li₃N, Solfuro di Mercurio HgS) e la maggior parte di essi necessita della presenza di metalli pesanti al loro interno per consentire l'attivazione del fenomeno di fotocromismo⁶. Da un punto di vista applicativo, essi trovano un largo impiego all'interno di contesti in cui l'obiettivo principale da raggiungere consiste nella limitazione della trasmissione di radiazione solare. Nel campo dell'oggettistica e degli accessori, ad esempio, essi vengono impiegati nella produzione di vetri parabrezza per le automobili o di lenti oftalmiche per la protezione dalla luce solare e dai raggi UV. Nel settore edile, invece, i materiali fotocromici lasciano intravedere buone possibilità di utilizzo, soprattutto grazie alla loro elevata durabilità dei trattamenti e alla loro resistenza agli agenti atmosferici esterni. Nonostante le approfondite ricerche svolte abbiano portato a intravedere elevati potenziali per futuri impieghi, attualmente i materiali fotocromici non hanno ancora raggiunto un ampio livello di diffusione, in quanto presentano alcune criticità legate principalmente all'uniformità della distribuzione della sostanza cromogenica all'interno del materiale edile, alla progressiva perdita di reversibilità nel tempo, alla difficoltà di

6 Tucci F., *Involucri cromogenici termocromici*, in "Il Progetto Sostenibile", Manzano (Udine), Dicembre 2011, Anno 9 - n° 30, pp. 20-25.

controllo e regolabilità del loro comportamento prestazionale, e all'elevato costo.

I materiali termocromici, in grado di variare le proprie caratteristiche attraverso la trasformazione del loro equilibrio molecolare, regolano il loro comportamento grazie all'impiego di componenti che possono essere composti organici, inorganici, film di ossidi metallici, o ancora gel polimerici.

Mentre i materiali termocromici sono caratterizzati da una riduzione nella trasmissione visibile che avviene attraverso una reazione chimica termicamente indotta, i materiali termotropici variano le loro proprietà compositive e cambiano fase fisica con l'aumento della temperatura, comportando fenomeni di *scattering*⁷ e di assorbimento alla luce che li colpisce.

Nell'ambito delle applicazioni generiche, i composti organici e inorganici sono quelli maggiormente utilizzati come materiali termocromici per la realizzazione di oggettistica, indumenti, accessori per bambini, inchiostri e altri oggetti termicamente reattivi. Nell'ambito architettonico, invece, sono maggiormente impiegati film di ossidi metallici e gel polimerici: pur essendo ancora oggetto di ricerche e approfondimenti, i risultati soddisfacenti finora ottenuti portano a considerare la loro applicazione con buone probabilità di successo.

Per quanto riguarda i rivestimenti termocromici, molte ricerche attualmente in corso sono rivolte al raggiungimento di una temperatura critica più vicina alla temperatura ideale per il comfort abitativo, dunque prossima ai 25°C. La regolazione della temperatura critica in grado di innescare il fenomeno di trasformazione cromatica di un dispositivo cromogenico avviene tramite l'aggiunta e la modulazione di particolari additivi.

Le recenti sperimentazioni svolte nell'ambito dell'applicazione dei dispositivi termocromici dimostrano la validità della soluzione proposta nel campo dell'architettura. Le potenzialità offerte da questa categoria di materiali consistono principalmente nella possibilità di autoregolarsi e mutare le proprie caratteristiche fisico-chimiche e ottiche in funzione dell'ambiente esterno e delle singole esigenze dell'utenza⁸.

In particolare, se impiegati per la realizzazione dell'involucro edilizio, questi materiali consentono di realizzare un sistema costruttivo innovativo dotato di un comportamento "dinamico", in grado di dare origine a un involucro che si discosta dalla ormai superata concezione di barriera tra ambiente interno ed esterno, per diventare un diaframma "attivo".

Attraverso l'integrazione di differenti componenti additivi, il comportamento termocromico può essere modificato e modulato in funzione delle prestazioni richieste dalle esigenze progettuali.

⁷ Con il termine *scattering* si indica la diffusione ottica, che si riferisce a una classe ampia di fenomeni caratterizzati dalla collisione tra le particelle o le onde, in seguito alla quale queste subiscono una deflessione. A differenza degli altri fenomeni ottici di riflessione e rifrazione, caratterizzati da un cambiamento regolare della traiettoria delle particelle quantistiche, la deflessione propria della diffusione ottica si distingue per la mancanza di ordine delle particelle, che vengono deviate in maniera casuale.

⁸ Karlessi T., Santamouris M., Apostolakis K., Synnefa M., Livada I., *Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures*, in "Journal of Solar Energy 83", 2009, pp. 538–551.

Tramite la formulazione della soluzione impiegata per dare origine al dispositivo termocromico, è possibile stabilire a priori sia la temperatura di *scattering*, sia la colorazione, sia lo spettro di variazione di temperatura, e dunque di colore, entro il quale si vuole operare, in base al clima esterno: in particolare, per gli ossidi metallici si può modificare il colore di transizione, mentre per le miscele polimeriche si può intervenire sul grado di uniformità e intensità della colorazione bianca opaca.

Se progettati correttamente, i dispositivi termocromici consentono di regolare gli apporti solari, conseguendo un miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio in regime estivo, favorendo la riflessione della radiazione solare e quindi diminuendo il surriscaldamento superficiale, così come in regime invernale, favorendo l'assorbimento e l'accumulo di calore solare. In quest'ottica, il processo di ottimizzazione del materiale termocromico è basato sulla misurazione del valore della trasmittanza in funzione della temperatura, della riflettanza, e del fenomeno di *scattering* che determinano il cambiamento di stato. Nonostante le misurazioni delle proprietà ottenute dai test di verifica effettuati dalle indagini finora svolte sul panorama della ricerca abbiano rilevato problematiche legate alla stabilità nel tempo dei materiali termocromici, in relazione al contesto climatico, al contempo hanno fatto emergere grandi potenzialità per il loro impiego, dimostrando la loro efficienza e la loro versatilità a seconda della loro formulazione.

I dati in letteratura, infatti, dimostrano che l'utilizzo di questa categoria di materiali può apportare effettivamente un notevole contributo nel processo di riduzione dei guadagni termici in regime estivo, diminuendo i fenomeni di surriscaldamento esterno e interno, e conseguentemente riducendo i consumi energetici per esigenze di raffrescamento⁹.

Attualmente, la principale applicazione dei materiali cromogenici a variazione termica riguarda comunque la produzione di indicatori di temperatura per oggettistica e dispositivi di sicurezza, o ancora vernici speciali per la tinteggiatura di superfici. Per la soluzione innovativa di involucro elaborata dal progetto di ricerca, si sceglie di inserire nella stratificazione della facciata un materiale cromogenico da esterno che funga da componente "dinamico", in grado di regolare il comportamento prestazionale del sistema edilizio.

In particolare, si prevede di impiegare una vernice termocromica capace di alterare le proprietà chimico-fisiche in seguito a una variazione della temperatura, da applicare come strato ultimo di finitura esterna del pannello prefabbricato. Attualmente, non sono presenti sul mercato vernici termocromiche per il rivestimento esterno degli edifici, in quanto ricerche scientifiche sono ancora in atto per migliorare la durabilità di questo materiale, la cui reversibilità dei pigmenti termocromici è fortemente minacciata dall'azione della radiazione solare. Al fine di esplorare una soluzione che risponda a questi requisiti, in relazione a una possibile applicazione come strato di finitura della stratificazione di involucro proposta, sono state attivate numerose ricerche in questo

9 Santamouris M., Synnefa M., Karlessi T., *Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions*, in "Journal of Solar Energy 85", 2011, pp. 3085–3102.

ambito, volte a migliorare le prestazioni di questo materiale e a renderne così possibile l'utilizzo nel campo dell'architettura¹⁰.

L'idea progettuale consiste nell'ottimizzazione della formulazione delle vernici termocromiche finora studiate, al fine di rispondere alle necessità di efficientamento energetico degli edifici, sia nell'ambito della nuova costruzione, che in quello del recupero del patrimonio.

Ad esempio, nel caso di edifici dotati di uno strato termicamente isolante posto esternamente (sistema a cappotto ETICS), lo strato ultimo di materiale cromogenico potrebbe ottimizzare le prestazioni energetiche dell'involucro durante l'alternarsi delle stagioni estate-inverno, conferendogli un comportamento "attivo". Durante l'inverno, il rivestimento termocromico assumerebbe una colorazione più scura che consentirebbe di assorbire la radiazione solare e dunque di accumulare energia termica, mentre durante l'estate la vernice diventerebbe più chiara, permettendo all'involucro di riflettere la radiazione solare e quindi di abbassare la temperatura superficiale [Fig. 102].

Analogamente, nel sistema di involucro oggetto di ricerca, lo strato esterno di vernice termocromica consente di regolare la quantità di radiazione solare assorbita e riflessa, e dunque la quantità di energia termica accumulata durante i cicli giorno-notte ed estate-inverno da parte dello strato isolante di malta geopolimerica AAM e di conseguenza dalla parete perimetrale esistente.

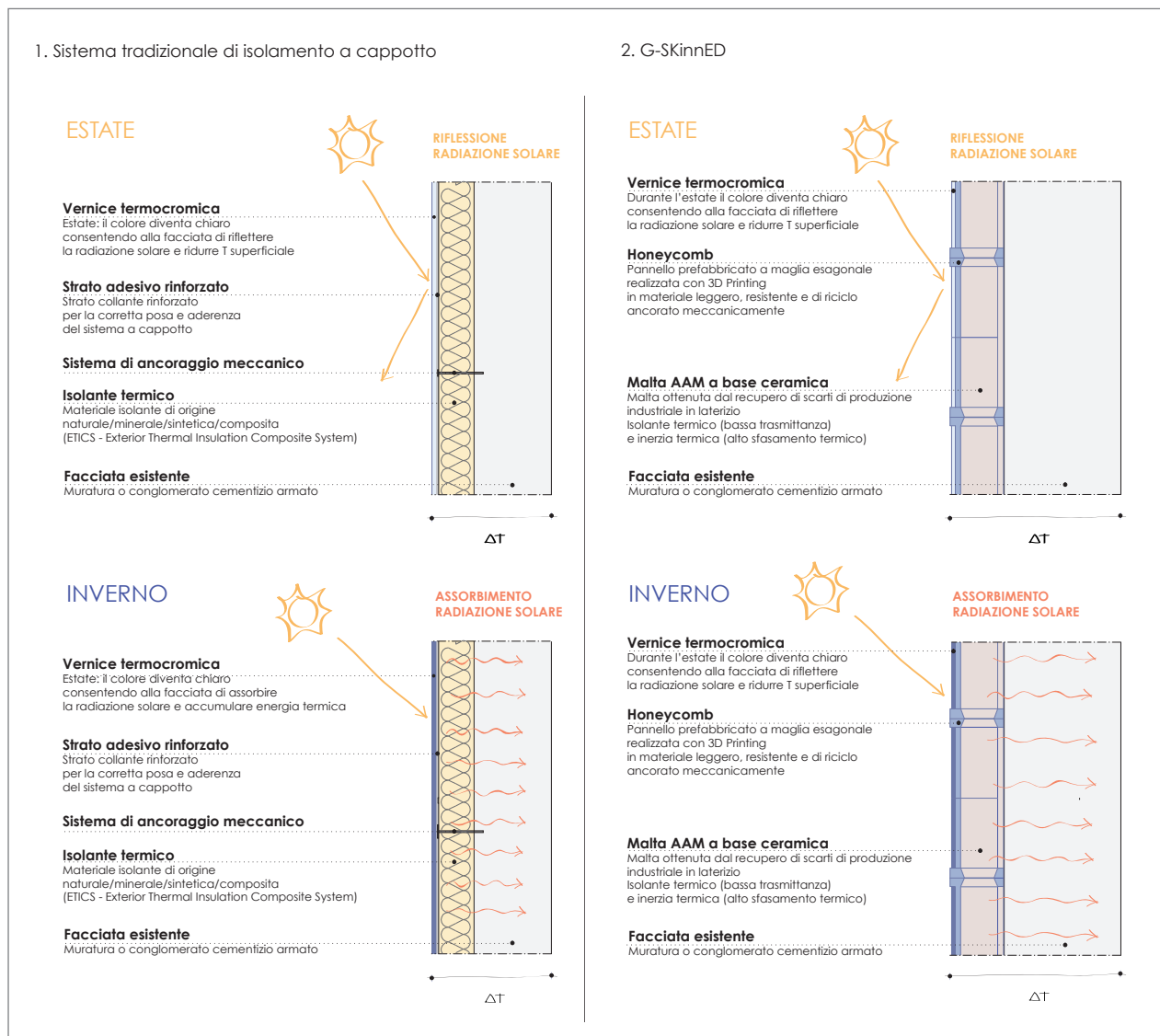
Futuri sviluppi della ricerca possono dimostrare l'efficienza ed efficacia della soluzione costruttiva proposta, grazie all'attenuazione del problema di fotodegradazione, mediante l'inserimento di un dispositivo di protezione dei pigmenti termocromici. Una delle modalità possibili di risoluzione di questo problema, proposto dal gruppo di ricerca CIRI, in collaborazione con il consorzio istituito, consiste nel sottoporre i pigmenti termocromici a un particolare trattamento di microincapsulazione.

Queste vernici termocromiche sono costituite da pigmenti a base di acqua, mescolati con un apposito legante e altri componenti stabilizzanti: la loro proprietà ottica legata al cambiamento reversibile di colore è resa possibile grazie a una trasformazione termica reversibile della struttura molecolare dei pigmenti, che produce uno spettro variabile di colore visibile. La reversibilità di questa capacità ottica risulta però il punto maggiormente critico della composizione dei pigmenti che, pertanto, devono essere microincapsulati mediante l'impiego di sostanze chimiche compatibili di protezione dai raggi solari e dall'ossidazione: nanomateriali a base di silice e titanio, antiossidanti e altre sostanze di assorbimento degli UV. Inoltre, al fine di migliorare la resistenza e la stabilità del materiale, si prevede di riciclare scarti di pannelli dismessi di schiuma di poluretano che, se

10 Per questo ambito di ricerca, il progetto si basa su indagini già svolte nel settore delle vernici termocromiche applicate all'edilizia e si avvale del consorzio tra SMEs a livello europeo e le Università di Bologna e di Atene. Il progetto *CHAMELEON - New Thermochromic adaptive solution for a design-driven optimized architectural and decorative industry* è stato presentato al Work Programme 2014/2015 "NMP 18: Materials solutions for use in the creative industry sector" di Horizon 2020. Il progetto, che non è stato selezionato in questa occasione, è stato riproposto con il nome di *GECKO* per la chiamata "NMP 25 – 2014/2015: Accelerating the uptake of nanotechnologies, advanced materials or advanced manufacturing and processing technologies by SMEs".

sottoposti a un processo di sintesi in dispersione acquosa, possono costituire il legante per la vernice termocromica. Questo fattore si inserisce perfettamente nel contesto di ricerca presentato, in quanto contribuisce all'elaborazione di materiali innovativi ecosostenibili, a matrice rinnovabile.

Attualmente, non esistono sul mercato prodotti dotati di queste proprietà adatti per essere applicati come rivestimento esterno nel settore edile: malgrado ciò, alla luce delle considerazioni svolte e delle potenzialità che il materiale presenta nell'ottica dell'efficientamento energetico, risulta di particolare interesse e rilievo condurre un approfondimento delle ricerche in questo ambito, al fine di mettere a punto un sistema di involucro attivo.



[Fig. 102] Schema rappresentativo del comportamento durante il regime estivo e invernale del sistema di involucro proposto G-SKinnED, dotato di un rivestimento ultimo "attivo" costituito da una vernice termocromica.

III.2.2 ANALISI MECCANICA E TERMICA

Dal punto di vista meccanico, il pannello di facciata proposto è considerabile come un sistema “ibrido” di chiusura verticale, collocandosi in una posizione intermedia fra i sistemi tradizionali di isolamento termico a cappotto e i pannelli prefabbricati massivi di tamponamento, di grande formato.

In generale, per questo particolare sistema di facciata, occorre fare riferimento alle normative attuali in ambito di tradizionali sistemi di isolamento termico a cappotto e di pannelli di tamponamento massivi per sistemi prefabbricati.

In aggiunta alle indicazioni fornite dalla normativa di riferimento per questi due sistemi costruttivi, ulteriori valutazioni possono essere avanzate in merito alla stabilità elevata propria di questo sistema di involucro, dato dalle proprietà intrinseche legate alla particolare forma geometrica che caratterizza i pannelli a trama esagonale. Infatti, il bordo sagomato a esagoni regolari complementari consente di sfruttare il sistema di incastro tra i pannelli posati, comportando una riduzione del sistema di ancoraggio meccanico puntuale alla facciata esistente, comunque fondamentale per garantire la connessione fra il pannello e la facciata esistente.

Per quanto riguarda i sistemi di isolamento termico a cappotto, in aggiunta alle normative **ETAG 004** - *Linee guida tecniche europee per Sistemi Isolanti a Cappotto per esterni con intonaco* ed **ETAG 014** - *Linee guida tecniche europee per tasselli in materiale plastico per Sistemi Isolanti a Cappotto*, emanate dall' EOTA (European Organisation for the Technical Approval), ente tecnico europeo di riferimento per il settore delle costruzioni, le normative nazionali possono prescrivere caratteristiche aggiuntive. Inoltre, aziende singole e consorzi si sono adoperati per redigere manuali e linee guida per la corretta posa in opera di questi sistemi di involucro, le tecniche di incollaggio, l'uso corretto dei tasselli, la stesura dei dettagli costruttivi più frequenti in cantiere.

In accordo con le indicazioni fornite dalla normativa per i tradizionali sistemi di isolamento termico a cappotto, tra il pannello e la facciata esistente di supporto, viene posto uno strato di collante. L'applicazione del collante può avvenire manualmente o a macchina, ma in entrambi i casi occorre verificare che la lastra sia fissata uniformemente alla superficie di supporto, per evitare scollamenti e rigonfiamenti, e che fra la lastra isolante e il supporto non vi sia passaggio dell'aria che potrebbe innescare l'effetto camino [Fig. 103].

Oltre allo strato di collante, si prevede il fissaggio meccanico aggiuntivo (obbligatorio nel caso del pannello in AAM), mediante dispositivi di ancoraggio alla facciata esistente, dimensionati adeguatamente per sopportare i carichi a cui il pannello è soggetto, dati dal carico verticale del peso proprio, sommato al carico orizzontale costituito dalla spinta o dalla depressione del vento. La normativa definisce i casi in cui è necessaria la tassellatura aggiuntiva, in ogni caso consigliata quando gli spessori del pannello superano i 10 cm.

La norma *ETAG 004* classifica i sistemi di isolamento a cappotto in base al tipo di fissaggio, differenziando i sistemi fissati soltanto con colla, da quelli fissati soltanto meccanicamente, in vista di una individuazione più chiara e precisa delle prove da eseguire ai fini della certificazione. In realtà, è sempre consigliabile optare per un sistema a cappotto che presenti un sistema di ancoraggio funzionante grazie alla collaborazione di colla e fissaggi meccanici: secondo questa configurazione, il sistema è vincolato al supporto tramite l'incollaggio, che trasferisce le tensioni termiche e i carichi, e grazie ai fissaggi meccanici, che collaborano con la colla per contrastare tensioni e carichi orizzontali.

In particolare, i tasselli sono normati dall'*ETAG 014* e dovrebbero presentare alcune principali caratteristiche tecniche indicate dalla norma:

- rigidità del piattello $\geq 0,3$ kN/mm (rif. *EOTA Technical Report 026*).
- portata del piattello $\geq 1,0$ kN (rif. *EOTA TR 026*).
- coefficiente di conducibilità termica puntuale $\leq 0,002$ W/K (rif. *EOTA TR 025*).

Inoltre, i tasselli devono essere idonei al supporto esistente, facendo riferimento alle cinque categorie di utilizzo¹¹ indicate nella norma *ETAG 014*. Qualora il supporto non possa essere classificato chiaramente, devono essere eseguite in cantiere alcune prove di tenuta allo strappo dei tasselli, in conformità alla normativa (All. D, *ETAG 014*), secondo modalità di svolgimento che prescrivono procedure specifiche, fra cui la valutazione della prova a trazione (svolta con temperature dell'aria esterna pari ad almeno +5°C), per la quale è richiesto il raggiungimento di una classe di carico N_1 pari ad almeno 0,15 kN.

Nell'ambito della determinazione della quantità di tasselli, la base per il computo delle prove di sicurezza statica è la norma **EN 1991-1-4**, unita ai rispettivi documenti nazionali di recepimento e applicazione. Il numero di tasselli derivante da questo calcolo dipende dalla resistenza allo strappo del tassello dal supporto, dal tipo e dalla qualità del materiale isolante (resistenza a trazione), dall'altezza e dalla forma dell'edificio, dal suo orientamento e dalla località.

Naturalmente, il ruolo dei tasselli risulta di fondamentale importanza specialmente in corrispondenza delle zone in cui l'azione del vento può creare situazioni di depressione considerevole. Infatti, in funzione del carico del vento viene determinata la larghezza delle zone perimetrali, sulle quali è necessario aumentare il numero dei tasselli: in generale, per tutti gli edifici e per tutti gli angoli, tale larghezza è pari ad almeno 1 m. Se l'altezza della facciata è superiore alla lunghezza, la larghezza della zona perimetrale sarà almeno pari al 10% della lunghezza; se invece l'altezza della facciata è minore della lunghezza, la larghezza della zona perimetrale sarà del 10% dell'altezza, ma non inferiore a 2 m. In generale, occorre applicare n. 4-6 tasselli per ogni m² di superficie, arrivando fino a n. 8-10 tasselli per m² in caso di scarsa tenuta superficiale del supporto.

¹¹ Categorie di utilizzo individuate dalla norma *ETAG 014*: calcestruzzo normale (A), blocchi pieni (B), blocchi cavi o forati (C), calcestruzzo alleggerito (D), calcestruzzo alveolare (E).

I tasselli devono essere inseriti a filo con l'isolante e possono essere inseriti soltanto quando il collante è completamente essiccato, mediante percussione o avvitamento, in base al tipo di tassello. Inoltre, occorre svolgere una verifica del corretto fissaggio di ogni singolo tassello e procedere alla rimozione dei tasselli piegati o allentati (con scarsa tenuta), da sostituire e da inserire effettuando un nuovo foro. Naturalmente, i fori non utilizzati devono poi essere riempiti con un materiale isolante compatibile.

Nelle tabelle seguenti, sono riportati gli schemi di riferimento per determinare la quantità di tasselli nella zona perimetrale dell'edificio, in funzione dell'altezza dell'edificio, della velocità specifica del vento e della topografia del luogo.

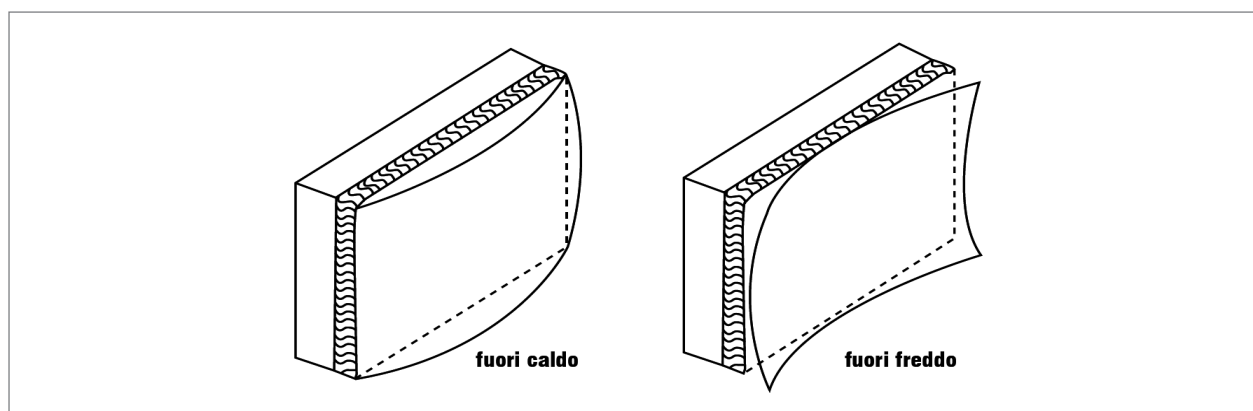
N. TASSELLI/m ² IN ZONA PERIMETRALE DELLA FACCIAA CON CARICO UTILE TASSELLI PARI A 0,20 kN									
VELOCITÀ VENTO V _b [m/s]	TOPOGRAFIA LUOGO								
	I			II			III		
	ALTEZZA EDIFICIO [m]								
	< 10	10-25	> 25-50	< 10	10-25	> 25-50	<10	10-25	> 25-50
≤28	6	6	6	6	6	6	6	6	6
28-32	8	8	10	8	6	8	6	6	8
>32	10	12	12	8	10	10	6	8	10

TOPOGRAFIA DEL LUOGO

I - Edifici isolati: area con vegetazione bassa, come erba e ostacoli isolati (alberi, edifici) con una distanza pari ad almeno 20 volte l'altezza degli ostacoli.

II - Edifici in contesti urbani aperti: area con una copertura regolare di vegetazione o edifici o con ostacoli isolati con distanza pari ad almeno 20 volte l'altezza degli ostacoli (come villaggi, terreni suburbani, foresta permanente).

III - Edifici in contesti urbani protetti dal vento: area in cui almeno il 15% della superficie è coperta con edifici e la loro altezza media supera i 15 m.



[Fig. 103] Schema rappresentativo del comportamento “a cuscino” o “a materasso” che potrebbe verificarsi per via di un non adeguato ancoraggio del pannello alla facciata esistente.

La topografia del luogo viene classificata secondo le tre seguenti categorie¹²: edifici isolati (I); edifici in contesti urbani aperti (II); edifici in contesti urbani protetti dal vento (III).

VALORI PARAMETRI $V_{b,0}$, a_0 , k_a (D.M. 14/01/08)

ZONA	DESCRIZIONE	$V_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (esclusa provincia di Trieste)	25	1.000	0,010
2	Emilia Romagna	25	750	0,015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,020
4	Sicilia, provincia di Reggio Calabria	28	500	0,020
5	Sardegna (zona a est della retta congiungente Capo Teulada con Isola della Maddalena)	28	750	0,015
6	Sardegna (zona a ovest della retta congiungente Capo Teulada con Isola della Maddalena)	28	500	0,020
7	Liguria	28	100	0,015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,010
9	Isole (escluse Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,020

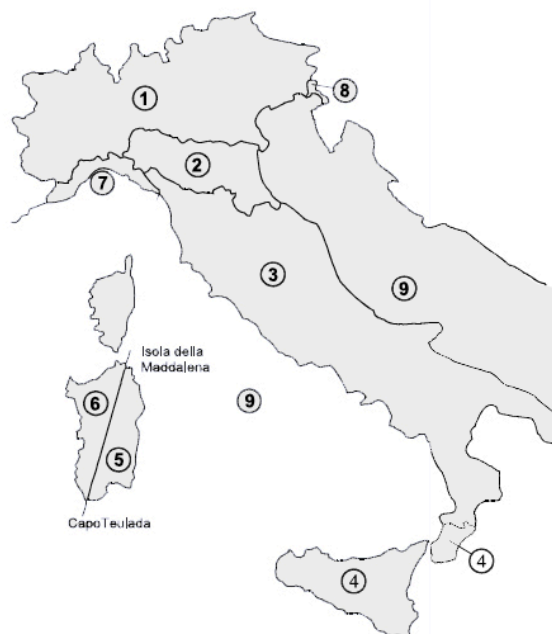
v_b è data dall'espressione (D.M. 14/01/08):

$$\begin{aligned} v_b &= v_{b,0} && \text{per } a_s \leq a_0 \\ v_b &= v_{b,0} + k_a (a_s - a_0) && \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m} \end{aligned}$$

dove:

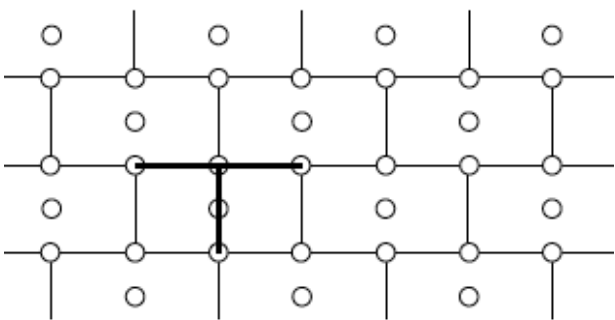
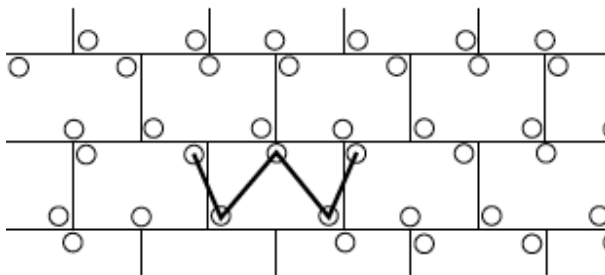
$v_{b,0}$, a_0 , k_a sono parametri forniti nel D.M. 14/01/08 e legati alla regione in cui sorge la costruzione in esame, in funzione delle zone definite in Fig. F1;

a_s è l'altitudine sul livello del mare (in m) del sito ove sorge la costruzione.



12 Queste classi corrispondono alle categorie II, III, IV dell'Eurocodice EN 1991-4: area con vegetazione bassa e ostacoli isolati con una distanza pari ad almeno 20 volte l'altezza degli ostacoli (II); area con copertura regolare di vegetazione o edifici o con ostacoli isolati con distanza pari ad almeno 20 volte l'altezza degli ostacoli (III); area in cui almeno il 15% della superficie è coperta con edifici e la loro altezza media supera i 15 m.

Qualora sia necessaria la tassellatura, prima di iniziare i lavori occorre definire lo schema di tassellatura. I seguenti schemi mostrano alcune possibili varianti¹³:

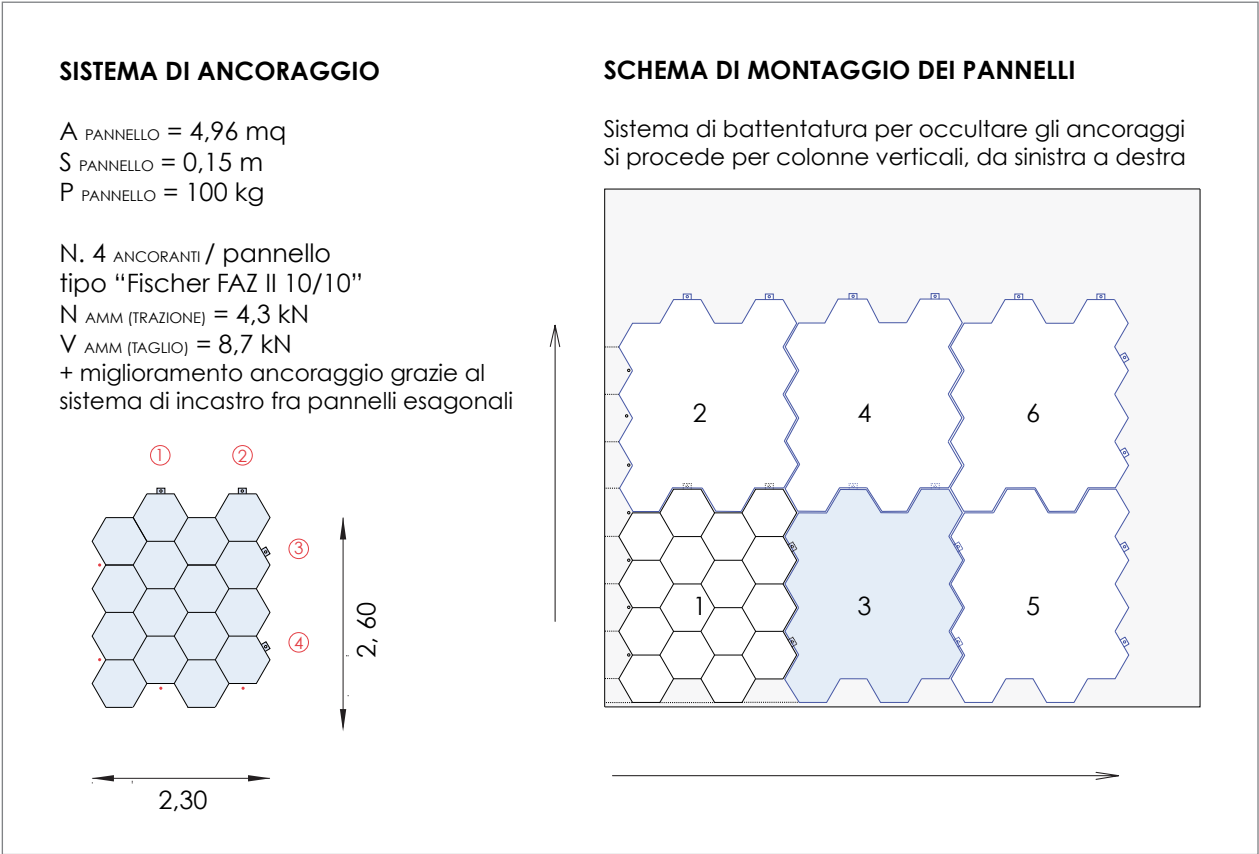
SCHEMA A T	SCHEMA A W
 <p>N. 1 TASSELLO AL CENTRO DI OGNI PANNELLO + N.1 TASSELLO AD OGNI VERTICE DI OGNI PANNELLO DI FORMA QUADRILATERA</p>	 <p>N. 3 TASSELLI PER OGNI PANNELLO</p>

Considerato il grande formato dei pannelli di facciata elaborati dal progetto (dimensioni di circa 260x230 cm, per uno spessore di 10 cm di isolante AAM, sommato a 4 cm di camera di microventilazione), in aggiunta alla normativa *ETAG* per i sistemi di isolamento termico a cappotto tradizionali, occorre fare riferimento anche alle normative attuali in tema di pannelli di tamponamento per sistemi prefabbricati.

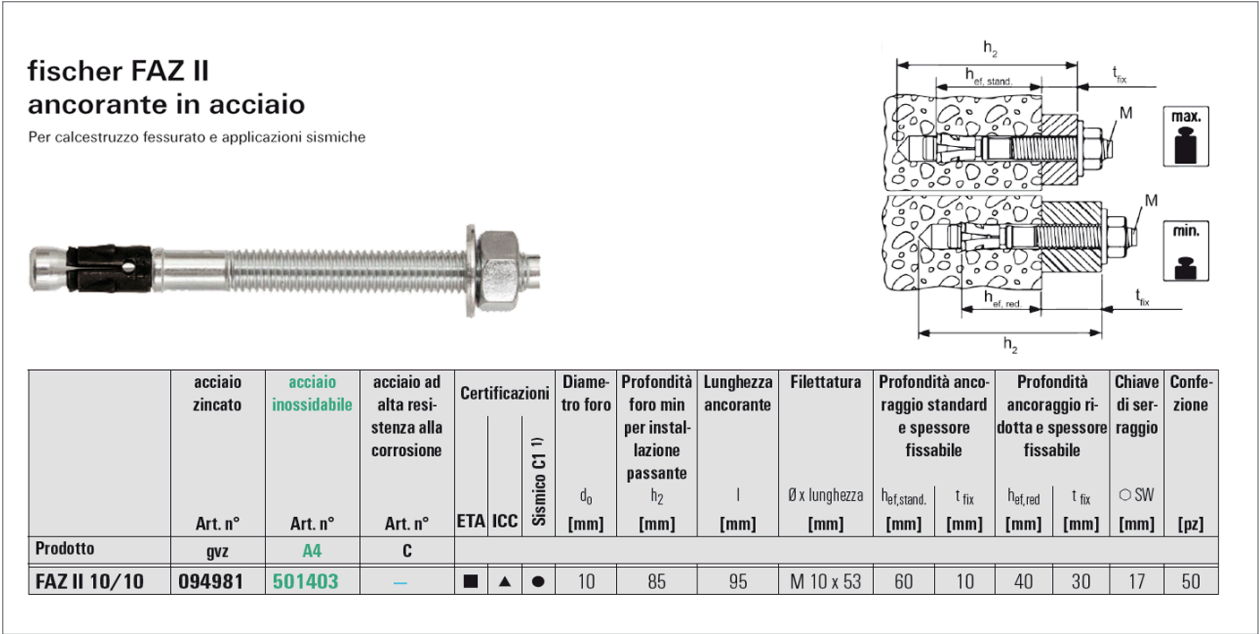
In particolare, il **D.M. del 14 gennaio 2008** - *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*, riporta le indicazioni per tutte le costruzioni civili e industriali, fra cui rientrano le strutture prefabbricate costituite da scheletro in cemento armato e pannelli di tamponamento in calcestruzzo. Inoltre, le *Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici*, redatte in seguito al sisma del 2012 in Emilia Romagna dal Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali, in collaborazione con la Federazione Regionale Ordini Ingegneri dell'Emilia Romagna, forniscono indicazioni molto importanti per la verifica della corretta connessione degli elementi secondari di tamponamento alla struttura portante.

Infine, la norma **UNI EN 12602:2013** rappresenta il riferimento legislativo principale per i componenti armati prefabbricati di calcestruzzo aerato autoclavato con impieghi strutturali e non strutturali (partizioni, rivestimenti, barriere acustiche), ai quali possono essere assimilati i pannelli di facciata proposti.

¹³ Questi schemi e queste indicazioni sono estratte dal manuale: Cortexa - Consorzio per la cultura del sistema a cappotto, *Manuale per l'applicazione del Sistema a Cappotto*, Cortexa, Calenzano (Firenze), Settembre 2012.



[Fig. 104] (A sinistra) Schema illustrativo del sistema di ancoraggio meccanico puntuale del pannello *G-SKinnED* alla facciata esistente (Categoria A - Calcestruzzo normale) redatto sulla base delle prescrizioni normative, in funzione delle specificità geometriche e costruttive del sistema. (A destra) Schema di montaggio, dal basso verso l'alto e da sinistra verso destra, dei pannelli dotati di un sistema di battentatura apposito per occultare gli ancoranti metallici.



[Fig. 105] Dati tecnici del sistema ancorante in acciaio tipo "Fisher FAZ II 10/10", previsto per l'ancoraggio del pannello alla facciata esistente.

In relazione a quanto appena esposto, si analizza la geometria dei moduli proposti per il sistema di involucro *G-SKinnED*, il più grande dei quali è di superficie pari a circa 5 m^2 , ipotizzando la loro applicazione per la riqualificazione energetica delle scuole del Comune di Bologna (Zona 2), per un edificio di altezza inferiore a 10 m, collocato in un luogo di categoria topografica II, caratterizzato da velocità del vento pari a 25 m/s.

In questo contesto climatico, secondo le normative *ETAG*, occorre che il sistema di isolamento a cappotto sia ancorato nella zona perimetrale della facciata da n. 6 tasselli per ogni m^2 , con carico utile dei tasselli pari a 0,20 kN.

Tale calcolo, però, non può essere considerato l'unico riferimento valido per il sistema di involucro *G-SKinnED*, basato sulla modulazione di superfici di grande formato, per motivi sia statici, sia costruttivi. La struttura resistente del pannello presenta una particolare conformazione che, grazie alla presenza di appositi fazzoletti asolati, consente l'ancoraggio dello stesso tramite ancoranti metallici filettati, maggiormente resistenti rispetto ai tasselli usati tradizionalmente per i sistemi a cappotto. Ogni pannello è dotato di un fazzoletto di ancoraggio perimetrale in corrispondenza degli elementi esagonali appartenenti alla riga sommitale e alla colonna laterale destra: questo schema deriva dalla necessità di dotare ogni pannello del numero sufficiente di ancoranti e, allo stesso tempo, di occultarne la vista grazie a un particolare sistema di sovrapposizione legato a un determinato schema di montaggio.

La scelta e il dimensionamento del tipo di ancorante deriva dalla valutazione del peso del modulo di facciata più grande e più massivo (pari a circa 100 kg), maggiorato del carico del vento influente sull'area del pannello (pari a circa 5 m^2), e dei carichi sismici relativi alla zona territoriale, moltiplicato per un coefficiente di sicurezza [Fig. 104].

In particolare, il sistema di ancoraggio meccanico puntuale scelto consiste in un ancorante di tipo “Fischer FAZ II 10/10” in acciaio, specifico per applicazioni sismiche su edifici in calcestruzzo, che presenta un carico ammissibile a trazione pari a 4,3 kN e a taglio pari a 8,7 kN. Grazie alla particolare conformazione del cono e della fascetta di espansione, la capacità di carico per carichi massimi in ogni condizione risulta notevolmente aumentata, garantendo le massime capacità portanti, a fronte di una riduzione del numero dei punti di fissaggio. Inoltre, grazie alla ridotta lunghezza ancorante, pari a 95 mm, la profondità ridotta del foro di 85 mm (per un diametro di 10 mm) rende notevolmente più veloce ed economica l'installazione [Fig. 105].

Peraltro, questo sistema di ancorante metallico corrisponde al dispositivo più largamente usato nei tradizionali sistemi di ancoraggio dei pannelli di tamponamento in calcestruzzo impiegati nell'edilizia prefabbricata, abbinato ai classici sistemi di collegamento fra elementi di tipo “Hal-fen”, ampiamente usato anche negli edifici scolastici classificati all'interno del progetto di ricerca.

Oltre alle prescrizioni normative in ambito di sistemi di ancoraggio per i pannelli isolanti di grande formato, è possibile svolgere ulteriori valutazioni in merito alle proprietà intrinseche date

dal particolare profilo segmentato dei pannelli a trama esagonale. Come si vede dall'immagine [Fig. 98], infatti, il bordo sagomato dei pannelli consente di sfruttare un meccanismo di autobloccaggio fra i componenti posati e quelli adiacenti già assemblati: tale conformazione determina un miglioramento del sistema di connessione fra i pannelli costituenti il secondo involucro, consentendo così l'alleggerimento del sistema di ancoraggio metallico impiegato.

In conclusione, occorre rilevare che, grazie a questo sistema di ancoraggio meccanico puntuale, è possibile procedere alla posa dei pannelli isolanti senza ricorrere all'utilizzo di una sotto-struttura metallica che, come noto, costituirebbe la voce di spesa maggiormente incidente del computo metrico estimativo (circa 100 €/mq). I pannelli prefabbricati esagonali vengono montati a secco secondo lo schema di montaggio [Fig. 104], seguendo un procedimento di posa in opera rapido che non richiede mezzi straordinari di sollevamento: inoltre, grazie al particolare sistema di incastro, una volta posati, i pannelli presentano stabilità, garantendo così una elevata velocità di montaggio.

Naturalmente, durante la fase di predimensionamento del pannello e del sistema di ancoraggio meccanico puntuale, occorre procedere anche alla verifica della stabilità dei tamponamenti esistenti, considerando il sovraccarico apportato dal peso del pannello di facciata (circa 20 kg/m²), e alla verifica della resistenza del sistema di ancorante scelto, mediante prove di resistenza a taglio e a trazione per il carico massimo determinato.

Per quanto riguarda l'analisi termica del sistema innovativo di involucro, occorre valutare le caratteristiche principali del materiale isolante geopolimerico impiegato, denominato *AAM - Alkali Activated Material*.

In linea con le istanze e i paradigmi di ricerca, esposti precedentemente all'interno dell'*Introduzione*, il materiale studiato presenta le seguenti proprietà:

- inorganicità (materiale a base di argilla, cruda o cotta);
- plasticità (versatilità applicativa);
- derivazione da materiale riciclato e riutilizzato (recupero di scarti di lavorazione dei laterizi);
- ecosostenibilità e basso impatto ambientale (processo di attivazione alcalina effettuato a temperatura ambiente, che consente di abbattere i costi e gli inquinamenti della cottura ad alte temperature);
- bassa energia inglobata (bassa emissione di CO₂ durante l'intero processo di produzione a temperatura ambiente, successiva installazione, vita utile e finale dismissione).

Dal punto di vista termico, già fin dalle prime indagini, questo materiale ha dimostrato grandi potenziali in relazione alle prestazioni termiche: si tratta infatti di un materiale derivante in gran parte dal laterizio, aggiunto a una soluzione attivatrice composta anche da un materiale siliceo a base vitrea, dotato di un buon coefficiente di conduzione termica. Da una preliminare analisi qualitativa basata sulle proprietà termiche dei componenti, il potere di isolamento termico atteso, in termini di conducibilità termica λ , si colloca fra quello del geopolimero a base di perlite¹⁴, pari a 0,03 W/m²K e quello a base di argilla cotta ad alta temperatura¹⁵, pari a 0,4 W/m²K. L'aggiunta di additivi aeranti contribuisce notevolmente alla riduzione del coefficiente di conduttività termica, grazie alla formazione di microbolle d'aria all'interno del materiale che assume così una struttura alveolare a porosità chiusa, portando il λ del materiale a 0,05 W/mK.

Oltre a presentare buoni valori di conducibilità termica, la malta AAM a base di polvere di laterizio, caratterizzata da una struttura alveolare, presenta buoni valori in termini di inerzia termica che, come verrà illustrato di seguito, risulta essere una proprietà fondamentale per il comportamento prestazionale dell'involucro edilizio.

Infatti, questo materiale innovativo risulta costituito per il 90% da polvere ceramica, combinata con una soluzione in grado di avviare il processo di attivazione alcalina a temperatura ambiente, a cui viene aggiunto un additivo aerante, capace di alleggerire notevolmente il materiale e di ottimizzarne le capacità termiche isolanti, grazie alla formazione di microbolle d'aria.

Come appare chiaramente dalla descrizione fornita in precedenza, i materiali ottenuti per attivazione alcalina si prestano alla necessità di utilizzare diverse tipologie di scarti industriali come

¹⁴ Vaou V., Panias D., *Thermal insulating foamy geopolymers from perlite*, in "Minerals Engineering", Elsevier Science, Volume 23, Issue 14, November 2010, pp. 1146-1151.

¹⁵ Oti J. E., Kinuthis J. M., Bai J., *Design thermal values for unfired clay bricks*, in "Materials & Design", Elsevier, Volume 31, Issue 1, January 2010, pp. 104-112.

precursori, riducendo così l'impatto ambientale rispetto ai processi di produzione dei materiali oggi utilizzati nel settore edile.

Oltre ad una elevata ecosostenibilità, le proprietà fisico-chimiche del materiale geopolimerico studiato presentano notevoli potenziali per il suo utilizzo in edilizia: buona resistenza a compressione e a flessione, buona lavorabilità, ridotta capacità di assorbimento dell'acqua e bassa porosità, bassa densità (variabile proporzionalmente al variare del rapporto tra il Biossido di Silicio e l'Ossido di Alluminio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, oltre che della quantità di agente aerante), ridotto coefficiente di conducibilità termica λ (in quanto costituito esclusivamente da componenti a base vitrea, e da una elevata percentuale di aria) e ridotto coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ (grazie all'aggiunta di agenti aeranti).

Grazie a una buona formulazione chimica dei componenti di attivazione del processo, è possibile controllare la densità, e dunque la lavorabilità, della malta AAM finale, più o meno consistente, impiegabile per una vasta gamma di applicazioni: spruzzato su superfici di involucro, applicato come tradizionale cemento o malta, gettato all'interno di stampi per la produzione di piastrelle o mattoni, o ancora gettato all'interno di casseforme a perdere per creare pannelli prefabbricati.

La versatilità del materiale oggetto di studio offre diverse applicazioni in ambito di efficientamento energetico mediante addizione in facciata: la sperimentazione costruttiva riportata successivamente è volta proprio alla verifica delle differenti modalità di posa in opera e alle differenti caratteristiche performanti, variabili in funzione della soluzione tecnica costruttiva adottata.

La soluzione di involucro finale *G-SKinnED* proposta dal progetto di ricerca prevede l'impiego del materiale AAM sotto forma di pannello termicamente isolante, dotato di una limitata conducibilità termica λ per contribuire al potere isolante della facciata, e di una elevata inerzia termica che, come noto, contribuisce al miglioramento del comfort interno, rivestendo un ruolo fondamentale in estate, soprattutto in presenza di elevati carichi interni.

Per garantire un buon livello di comfort abitativo, infatti, è necessario che i materiali isolanti impiegati per la realizzazione dell'involucro edilizio presentino determinate caratteristiche, tra cui un buon isolamento termico, al fine di diminuire le dispersioni e dunque i consumi energetici. Un elevato livello di isolamento termico (bassa conducibilità termica λ , elevata resistenza termica R) comporta notevoli benefici in termini energetici e al contempo economici, in quanto incide direttamente sul fabbisogno termico e, di conseguenza, sui costi di gestione del riscaldamento invernale e di raffrescamento estivo.

Oltre all'isolamento termico, ossia alla capacità di non condurre calore, l'involucro edilizio deve infatti presentare una elevata inerzia termica, data dalla capacità di immagazzinare calore e di rilasciarlo gradualmente mantenendo una temperatura interna pressoché costante. Tale capacità di attenuazione delle variazioni termiche rappresenta un fattore molto importante specialmente nei contesti territoriali caratterizzati da clima mediterraneo.

In quest'ottica, un materiale termicamente isolante da impiegare per la realizzazione di un involucro edilizio dotato di queste caratteristiche deve essere dotato di elevata porosità (celle chiuse), igroscopicità nulla, e capacità di igroregolazione dell'umidità in eccesso presente negli ambienti interni. Queste proprietà risultano fondamentali per i tradizionali sistemi di isolamento a cappotto, in termini di comfort igrotermico e di eliminazione della formazione di condensa.

A questo proposito, infatti, occorre soffermarsi sui valori da tenere in considerazione in ambito di valutazione dell'efficienza energetica degli edifici, con particolare sguardo al componente di involucro edilizio, in termini di stratificazione dei materiali impiegati. La normativa di riferimento è il *D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59* sul rendimento energetico in edilizia, che introduce per la prima volta la trasmittanza termica periodica Y_{IE} [W/m²K], una nuova grandezza da considerare accuratamente, insieme allo sfasamento Φ [h] e al fattore di attenuazione f_d [-].

Ricerche e studi in letteratura, svolti sulla base di analisi teoriche e monitoraggi, dimostrano l'importanza dell'inerzia termica interna dell'involucro in estate, specialmente se in presenza di elevati carichi interni (persone, elettrodomestici, radiazione diffusa in ingresso attraverso le superfici vetrate), come ad esempio accade all'interno degli edifici scolastici¹⁶. Questa affermazione acquista ulteriore valore se contestualizzata nell'area geografica in questione (regione Emilia-Romagna, zona climatica E), caratterizzata da clima mediterraneo, nella totalità delle sue specificità climatiche, durante il regime invernale ed estivo.

Il **D.lgs. 19 agosto 2005, n.192**¹⁷, aggiornato dal **D.lgs. 29 dicembre 2006, n.311**¹⁸, relativo al rendimento energetico in edilizia, si concentra essenzialmente sul risparmio energetico durante la stagione invernale, imponendo dei limiti sui valori della trasmittanza termica stazionaria U [W/m²K] e sul fabbisogno di energia primaria dell'edificio EP_H [kWh/m²anno]. Per quanto riguarda invece la stagione estiva, il decreto regola il comfort termico imponendo un limite inferiore di massa superficiale M_s pari a 230 kg/m² nelle località più soleggiate, caratterizzate da un valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale $I_{m,s} \geq 290$ W/m². Attendendosi a tali limiti, è possibile realizzare involucri costituiti esclusivamente da materiali leggeri e coibenti che rispettino le trasmittanze fissate, ma che nei nostri climi presentano inevitabilmente problemi significativi legati al surriscaldamento estivo.

16 Di Perna C., Stazi F., Ursini Casalena A., Stazi A., *Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica*, in "L'industria dei Laterizi", n. 110, marzo-aprile 2008, pp. 88-101.

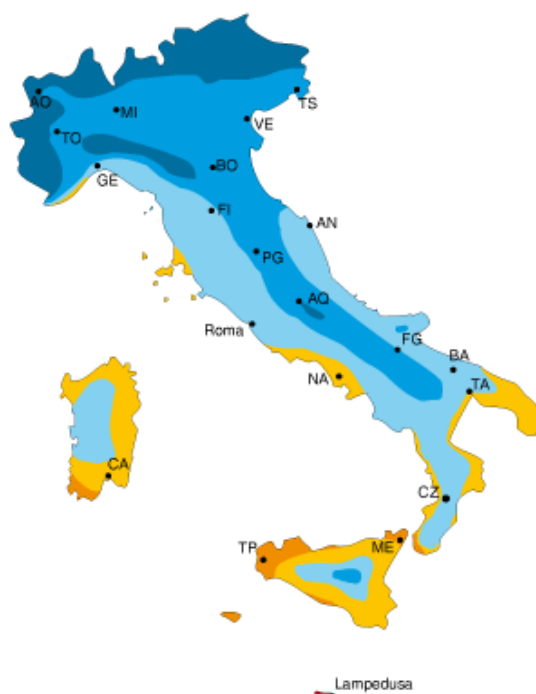
17 D.lgs. 19 agosto 2005, n.192 - *Attuazione direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*

18 D.lgs. 29 dicembre 2006, n.311 - *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia*

VALORI LIMITE DELLA TRASMITTANZA TERMICA U DELLE STRUTTURE OPACHE VERTICALI

ZONA CLIMATICA	DAL 1/1/2006 U [W/m²K]	DAL 1/1/2008 U [W/m²K]	DAL 1/1/2010 U [W/m²K]
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

SCHEMA ZONE CLIMATICHE (D.P.R. 26 AGOSTO 1993, N.412)



Legenda: GG = gradi giorno

- **Zona A**
GG ≤ 600 (Lampedusa, Porto Empedocle)
- **Zona B**
601 ≤ GG ≤ 900 (Agrigento, Reggio Calabria, Messina, Trapani)
- **Zona C**
901 ≤ GG ≤ 1400 (Napoli, Imperia, Taranto, Cagliari)
- **Zona D**
1401 ≤ GG ≤ 2100 (Firenze, Foggia, Roma, Ancona, Oristano)
- **Zona E**
2101 ≤ GG ≤ 3000 (Aosta, Torino, Milano, Bologna, L'Aquila)
- **Zona F**
GG ≥ 3001 (Belluno, Cuneo)

Qualche anno dopo, il **D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59**¹⁹ elimina il vincolo sulla massa superficiale dell'involucro, sostituendolo con un limite sulla trasmittanza termica periodica $Y_{IE} = f_d \cdot U$ pari a 0,12 W/m²K per le pareti opache verticali, orizzontali o inclinate, sempre per le località più soleggiate ($I_{m,s} \geq 290$ W/m²), considerando il fattore di attenuazione f_d . Il decreto introduce e definisce la trasmittanza termica periodica Y_{IE} come il parametro che valuta la capacità di una parete opaca di sfasare ed attenuare il flusso termico che la attraversa nell'arco delle 24 ore, definita e determinata secondo la norma **UNI EN ISO 13786** e successivi aggiornamenti.

In particolare, l'articolo 4 al comma 18 ne impone la valutazione, prescrivendo determinate verifiche. "Il progettista, al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva e di contenere la temperatura interna degli ambienti, nel caso di edifici di nuova costruzione e nel caso di ristrutturazioni totali di edifici esistenti: (...) esegue, in tutte le zone climatiche ad esclusione della F, per le località nelle quali il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale $I_{m,s}$, nel mese di massima insolazione estiva, sia maggiore o uguale a 290 W/m²:

1. relativamente a tutte le *pareti verticali opache* con l'eccezione di quelle comprese nel quadrante nord-ovest/nord/nord-est, almeno una delle seguenti verifiche:
 - che il valore della massa superficiale M_s , di cui al comma 22 dell'allegato A, sia superiore a 230 kg/m²;
 - che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica (Y_{IE}), di cui al comma 4, dell'articolo 2, sia inferiore a 0,12 W/m²K;
2. relativamente a tutte le *pareti opache orizzontali ed inclinate* che il valore del modulo della trasmittanza termica periodica Y_{IE} sia inferiore a 0,20 W/m²K."

L'eliminazione del vincolo sulla massa superficiale, sostituito dal vincolo posto sulla trasmittanza termica periodica Y_{IE} , comporta la possibilità di realizzare involucri con bassa inerzia termica ed elevata capacità isolante, fino ad arrivare alla soluzione progettuale estrema di un involucro costituito interamente da materiale isolante, rispondente ai requisiti della normativa.

Una valutazione in questo senso viene ripresa dal **D.M. 26 giugno 2009, n. 158**²⁰, che fornisce le Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici. In particolare, ai fini della valutazione della qualità termica estiva dell'involucro edilizio, il decreto afferma che si può procedere alla determinazione di indicatori, quali lo sfasamento ϕ [h] e il fattore di attenuazione f_d [-]. Il riferimento nazionale per il calcolo di tali indicatori è la norma tecnica **UNI EN ISO 13786:2007**, che definisce lo sfasamento ϕ come il ritardo temporale fra il massimo del flusso termico entrante

¹⁹ D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59 - *Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia - Metodologie per il calcolo della prestazione energetica di edifici e impianti*

²⁰ D.M. (Sviluppo economico) 26/06/2009, n. 158 - *Ministero dello Sviluppo economico - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*

nell'ambiente interno e il massimo della temperatura dell'ambiente esterno, e il fattore di attenuazione f_d come il rapporto fra il modulo della trasmittanza termica dinamica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie.

Il metodo di calcolo riportato nella norma *UNI EN ISO 13786*, volto a stabilire le caratteristiche termiche dinamiche dei componenti edili attraverso la valutazione dell'inerzia termica in termini di sfasamento e di fattore di attenuazione, riporta valori minimi limite di φ pari a 8-9 h, considerato ottimale se uguale e superiore a 10-12 h, e un limite minimo di f_d pari a 0,40.

Studi riportati in letteratura, svolti a partire da simulazioni e monitoraggi su casi di studio, dimostrano l'efficacia dell'approccio basato sulla valutazione della trasmittanza termica periodica al fine di ottimizzare il risparmio energetico negli interventi di nuova costruzione e di recupero del costruito.

Secondo questo approccio, però, non è possibile dimostrare e valutare quantitativamente l'inadeguatezza per il clima mediterraneo di involucri leggeri notevolmente coibenti e scarsamente inerti, specialmente in relazione al comfort abitativo. Occorre, infatti, distinguere fra regime invernale ed estivo, e considerare la totalità dei carichi termici coinvolti nella definizione del comportamento energetico di un edificio, dunque tenendo in conto sia i flussi di calore entranti dall'esterno (irraggiamento e conduzione solare attraverso l'involucro), sia i flussi uscenti, prodotti all'interno dell'edificio (utenza, impianti, elettrodomestici, radiazione diffusa in ingresso attraverso le superfici trasparenti).

L'analisi termica di un edificio durante la stagione invernale si basa soltanto sulla valutazione della trasmittanza termica stazionaria U , che rappresenta l'unico fattore che influenza fortemente il comportamento energetico. Nell'analisi termica durante la stagione estiva, invece, oltre al parametro Y_{IE} , occorre considerare anche l'incidenza dei carichi interni mediante la valutazione di temperature superficiali, temperature operative e assonometria radiante, al fine di ragionare non soltanto in termini di risparmio energetico, bensì anche di comfort abitativo. In quest'ottica, una parete notevolmente coibentata ma scarsamente inerte, sopra citata, seppur rispondente alla normativa, reagisce alle sollecitazioni dei carichi interni in maniera meno efficiente dal punto di vista del benessere abitativo, in quanto comporta oscillazioni maggiori delle temperature interne, oltre che temperature superficiali e operanti più elevate, rispetto a una parete dotata di inerzia termica.

Sulla base di queste valutazioni e delle prescrizioni fornite dalla norma *UNI EN ISO 13786*, è opportuno inserire un nuovo parametro che, in aggiunta ai limiti sulla trasmittanza termica stazionaria U e periodica Y_{IE} che tengono conto di carichi esterni, sfasamento termico e fattore di attenuazione, consideri anche i carichi interni all'interno dell'analisi energetica di un edificio: la capacità termica areica periodica interna C_{IP} .

Questo parametro è definito come la funzione della profondità di penetrazione dell'onda termica, in grado di descrivere la capacità effettiva di accumulo del calore sul lato interno di un

componente edilizio, che rappresenta lo spessore della massa termica interna che effettivamente contribuisce, in estate, a ridurre le temperature superficiali interne e ad attenuare la temperatura operante²¹. Analisi e monitoraggi svolti nell'ambito di precedenti ricerche dimostrano che gli involucri che presentano prestazioni migliori in termini di comfort abitativo sono proprio quelli con capacità termica areica periodica interna maggiore, ossia quelle dotate di un elevato potenziale di accumulo sul lato interno²².

Questo dato assume notevole importanza in rapporto alla valutazione del comfort interno di edifici normalmente affollati, come scuole e uffici, che presentano elevati carichi interni: per questa tipologia di edifici, i valori di temperatura superficiale risultano molto elevati durante il periodo estivo, specialmente nel caso di fabbricati dotati di un involucro caratterizzato da una C_{IP} ridotta.

Si può affermare, quindi, che per gli edifici scolastici sia preferibile realizzare involucri dotati di un'elevata capacità termica areica periodica interna, in quanto tale parametro presenta un'importante incidenza sul comportamento termico dell'edificio, variabile in funzione del valore della trasmittanza termica periodica. Infatti, effettuando un intervento di efficientamento energetico volto a ridurre il valore di Y_{IE} (quale l'applicazione di un tradizionale sistema di isolamento termico a cappotto), di conseguenza si ottiene una diminuzione dei carichi interni e al contempo di C_{IP} .

Risulta quindi opportuno assegnare un limite di C_{IP} , variabile in funzione del valore di Y_{IE} che, da normativa, non deve essere superiore a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$, secondo la definizione di coppie di valori $Y_{IE} - C_{IP}$ che presentano analoghe risposte in termini di comfort abitativo durante la fase estiva²³:

TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA $Y_{IE} \text{ [W/m}^2\text{K]}$	CAPACITÀ TERMICA AREICA INTERNA PERIODICA $C_{IP} \text{ [kJ/m}^2\text{K]}$
$Y_{IE} \leq 0,04$	$C_{IP} \geq 50$
$0,04 < Y_{IE} \leq 0,08$	$C_{IP} \geq 70$
$0,08 < Y_{IE} \leq 0,12$	$C_{IP} \geq 90$

21 Di Perna C., Stazi F., Ursini Casalena A., Stazi A., *Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica*, in "L'industria dei Laterizi", n. 110, marzo-aprile 2008, pp. 88-101.

22 Stazi F., Di Perna C., Mengaroni E., *Effectiveness of natural ventilation and thermal inertia on the internal comfort of an office building*, in "Atti del Terzo Congresso Internazionale Ar.Tec.", 21-23 novembre 2007, Alinea, Ancona 2007.

23 Di Perna C., Stazi F., Ursini Casalena A., Stazi A., *Massa e comfort: necessità di una adeguata capacità termica areica interna periodica*, in "L'industria dei Laterizi", n. 110, marzo-aprile 2008, pp. 88-101.

In conclusione, si può affermare che, durante le stagioni estive e intermedie, la soluzione costruttiva di involucro che consente di ottenere i livelli più elevati di benessere abitativo consiste sempre in quella dotata di una elevata inerzia termica sul lato interno e un elevato valore di capacità termica areica interna periodica.

In questo senso, la stratificazione derivante dal sistema di recupero dell'involucro proposta dal progetto di ricerca, che abbina alla parete esistente in conglomerato cementizio armato uno strato termico isolante in materiale geopolimerico AAM, dotata di una buona inerzia termica, risponde accettabilmente ai requisiti di risparmio energetico e comfort interno.

Sulla base di queste valutazioni, si procede all'analisi termica del sistema costruttivo di involucro proposto secondo il medesimo approccio, valutando le proprietà enunciate sopra per un repertorio selezionato di soluzioni murarie perimetrali, al variare delle formulazioni di malta geopolimerica AAM aerata con differenti additivi, in funzione delle proprietà fisiche ottenute e degli spessori previsti dei pannelli isolanti. L'analisi termica avviene tramite lo svolgimento di una simulazione delle soluzioni valutate, mediante l'impiego di un software che calcoli i parametri richiesti per determinare le proprietà termiche dell'involucro studiato, e che svolga la verifica di Glaser per individuare l'eventuale formazione di condensa²⁴.

In particolare, in virtù di quanto rilevato all'interno di questo paragrafo, si utilizza un software di calcolo che consenta di svolgere un'analisi termica della soluzione costruttiva di involucro, distinguendo il regime stazionario da quello periodico stabilizzato, in modo tale da valutare i parametri energetici durante la stagione invernale e la stagione estiva, con o senza carichi interni.

Di seguito si riportano in tabella i parametri che sono valutati in via teorica e sperimentale, al fine di verificare la rispondenza del materiale ai requisiti prestazionali.

REGIME STAZIONARIO		
PARAMETRO	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
Massa superficiale	M_s	[kg/m ²]
Resistenza termica totale	R_t	[m ² K/W]
Trasmittanza termica stazionaria	U	[W/m ² K]
Conduttività termica	λ o C	[W/mK]
Capacità termica areica	C_{ta}	[kJ/m ² K]
Costante di tempo	τ	[h]

²⁴ Esistono molteplici software utilizzabili per questi scopi, tra cui i più comuni sono: *EdilClima*, *Termo*, *Gema-Vap*, software opensource fornito da *MyGreenBuildings.org*.

REGIME PERIODICO STABILIZZATO		
PARAMETRO	SIMBOLO	UNITÀ DI MISURA
Fattore di decremento-attenuazione	f_d	[-]
Ritardo fattore di decremento-sfasamento	φ	[h]
Trasmittanza termica periodica	$ Y_{IE} $	[W/m ² K]
Ammettenza termica lato interno	Y_{II}	[W/m ² K . h]
Ammettenza termica lato esterno	Y_{EE}	[W/m ² K . h]
Capacità termica areica periodica lato interno	C_{IP}	[W/m ² K]
Capacità termica areica periodica lato esterno	C_{EP}	[kJ/m ² K]
Fattore di smorzamento superficiale interno per parete disperdente	f_{sd}	[-]
Fattore di smorzamento superficiale interno per parete interna	f_{si}	[-]

In linea con questo approccio, viene svolto il calcolo delle proprietà termiche dinamiche del componente edilizio di involucro proposto per l'efficientamento energetico delle pareti perimetrali delle scuole esistenti oggetto di studio, caratterizzate prevalentemente da un tamponamento in pannelli prefabbricati di conglomerato cementizio, con intercapedine di isolante termico in EPS.

Di seguito, si riporta il foglio di calcolo Excel messo a disposizione dal sito *MyGreenBuildings.org*, relativo al calcolo della trasmittanza termica periodica della soluzione di involucro proposto per il recupero di questi involucri, mediante aggiunta di uno strato isolante in malta geopolimerica aerata AAM, secondo i requisiti prestazionali imposti dalla norma *UNI EN ISO 13786*.

In particolare, ci si riferisce a un materiale termico isolante geopolimerico AAM caratterizzato dai valori seguenti, corrispondenti ai valori ricercati durante le successive sperimentazioni costruttive: densità $d = 200 \text{ kg/m}^3$, coefficiente di conducibilità $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, calore specifico $c_s = 1.080 \text{ J/kgK}$, coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo $\mu = 5$, resistenza meccanica a compressione $R_c = 3,5 \text{ MPa}$.

Come si osserva dal confronto dei valori ottenuti dal calcolo della trasmittanza termica periodica relativi all'involucro dell'edificio scolastico campione [Fig. 106] e al sistema di involucro proposto per l'efficientamento energetico [Fig. 107], dotato di uno strato isolante e massivo esterno in materiale geopolimerico AAM, grazie all'intervento è possibile rientrare all'interno dei requisiti minimi richiesti dalla normativa.

Infatti, si passa da un valore iniziale non regolamentare di trasmittanza termica stazionaria

$U = 0,927 \text{ W/m}^2\text{K}$, fornito dalla parete perimetrale esistente in doppio strato di conglomerato cementizio armato con intercapedine isolante in polistirene, di spessore totale 21 cm, a una struttura regolamentare caratterizzata da un valore di $U = 0,325 \text{ W/m}^2\text{K}$, nel rispetto del *D.lgs 29 dicembre 2006, n. 311*, che impone una U limite di $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Inoltre, si passa da un valore scadente di trasmittanza termica periodica $Y_{IE} = 0,5300 \text{ W/m}^2\text{K}$, a un valore buono pari a $0,0319 \text{ W/m}^2\text{K}$, inferiore al limite imposto dal *D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59*, pari a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le pareti opache verticali, orizzontali o inclinate, per le località più soleggiate.

Infine, come indicato nella tabella precedente di coppie di valori $Y_{IE} - C_{IP}$ che presentano analoghe risposte in termini di comfort abitativo in fase estiva, mediante questo intervento viene rispettato anche il valore di $C_{IP} = 113,63 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, che supera abbondantemente il limite indicato di $C_{IP} \geq 50$ per $Y_{IE} \leq 0,04$.

In conclusione, l'analisi teorica in regime stazionario del sistema costruttivo di involucro proposto fornisce buoni valori di trasmittanza e inerzia termica, consentendo di garantire un buon comportamento energetico e un maggiore comfort abitativo.

Nella pagina successiva, si riporta l'analisi termica dell'involucro della Scuola Media "Dozza", ottenuto mediante l'applicazione dell'intervento di recupero denominato *G-SKinnED*, svolta con il software *GemaVap 4.3* che, agendo in regime stazionario, fornisce i valori termici necessari per lo svolgimento della verifica termoigrometrica.

1) Scegliere il tipo di componente edilizio				2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (≤ 24 ore)				24						
Chiusura verticale				Periodo delle variazioni termiche T				[sec]	86400					
				Resistenza termica sup interna Rsi				[m ² K/W]	0,13					
				Resistenza termica sup esterna Rse				[m ² K/W]	0,04					
Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m ² K/W]					
Rsi	aria	Strato laminare interno							0,130					
1		pannello prefabb. cemento	0,090	1,130	0,080	837	1600	0,152	0,591					
2		isolante polistirene	0,030	0,040	0,750	1256	35	0,158	0,190					
3		pannello prefabb. cemento	0,090	1,130	0,080	837	1600	0,152	0,591					
4									-					
5									-					
6									-					
7									-					
8									-					
9									-					
10									-					
Rse	aria	Strato laminare esterno							0,040					
Spessore totale componente [cm]				21,00		Resistenza termica totale [m ² K/W]				1,079				
http://www.mygreenbuildings.org				RISULTATI										
Regime periodico stabilizzato				T = 24 ore		Regime stazionario								
Fattore di decremento - attenuazione				fd	[-]	0,5720	Massa superficiale				Ms	[kg/m ²]	289,05	
Ritardo fattore di decremento - sfasamento				φ	[h]	5,98	Resistenza termica totale				Rt	[m ² K/W]	1,079	
Trasmittanza termica periodica				[Yie]	[W/m ² K]	0,5300	Trasmittanza				U	[W/m ² K]	0,927	
Ammettenza termica lato interno				Yii	[W/m ² K] [h]	4,842	-9,73	Conduttanza				C	[W/m ² K]	1,100
Ammettenza termica lato esterno				Yee	[W/m ² K] [h]	7,111	-8,35	Capacità termica areica				Cta	[kJ/m ² K]	242,37
Capacità termica areica lato interno				Cip(2007)	[kJ/m ² K]	116,77	70,90	Costante di tempo				τ	[h]	72,66
Capacità termica areica lato esterno				Cep(2007)	[kJ/m ² K]	116,77	103,80							
Fattore di smorzamento superficiale interno							(esterno)							
Parete disperdente				fsd	[-]	0,371	0,076							
Parete interna				fsi	[-]	0,330	0,019							
Dati acustici				Stratigrafia del componente edilizio										
Indice potere fonoisolante				Rw (dB)	[dB]	47,22								
Rapporto tecnico UNI														
Laboratori italiani														
Formula CEN														
Altre formule														
Pareti monostrato														
In laterizio alleggerito														
In laterizio														
In blocchi di argilla espansa														
Pareti doppie														
In laterizio, interc. > 5 cm con materiale fibroso														
In blocchi di argilla espansa, interc. senza materiale fibroso														
Solai														
Solai in laterocemento														
Indice livello rumore da calpestio equivalente				Lnw,eq	[dB]	-								

E' vietato l'uso del codice per la creazione di software commerciali senza autorizzazione

Questo/a opera è pubblicato sotto una Licenza Creative Commons.

N.B.: L'autore non è responsabile dell'uso del software e declina ogni responsabilità per eventuali conseguenze dirette, indirette o accidentali

[Fig. 106] Foglio di calcolo della trasmittanza termica periodica dell'involucro originale dell'edificio scolastico cam-pione esistente (UNI EN ISO 13786).

1) Scegliere il tipo di componente edilizio				2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)				24							
Chiusura verticale				Periodo delle variazioni termiche T				[sec]	86400						
				Resistenza termica sup interna Rsi				[m2K/W]	0,13						
				Resistenza termica sup esterna Rse				[m2K/W]	0,04						
Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2K/w]					
Rsi	aria	Strato laminare interno								0,130					
1		pannello prefabb. cemento	0,090	1,130	0,080	837	1600	0,152	0,591	0,080					
2		isolante polistirene	0,030	0,040	0,750	1256	35	0,158	0,190	0,750					
3		pannello prefabb. Cemento	0,090	1,130	0,080	837	1600	0,152	0,591	0,080					
4		isolante geo AAM	0,100	0,050	2,000	1080	200	0,080	1,253	2,000					
5								-	-	-					
6								-	-	-					
7								-	-	-					
8								-	-	-					
9								-	-	-					
10								-	-	-					
Rse	aria	Strato laminare esterno								0,040					
Spessore totale componente [cm]				31,00		Resistenza termica totale [m2K/W]				3,079					
http://www.mygreenbuildings.org				RISULTATI				2009 @ Ing. Andrea Ursini Casalena							
Regime periodico stabilizzato				T = 24 ore		Regime stazionario									
Fattore di decremento - attenuazione				fd [-]		0,0982		Massa superficiale				Ms [kg/m2]		309,05	
Ritardo fattore di decremento - sfasamento				φ [h]		11,50		Resistenza termica totale				Rt [m2K/W]		3,079	
Trasmittanza termica periodica				Yie [W/m2K]		0,0319		Trasmittanza				U [W/m2K]		0,325	
Ammettenza termica lato interno				Yii [W/m2K] [h]		4,844 -9,76		Conduttanza				C [W/m2K]		0,344	
Ammettenza termica lato esterno				Yee [W/m2K] [h]		0,782 -9,42		Capacità termica areica				Cta [kJ/m2K]		263,97	
Capacità termica areica lato interno				Cip(2007) [kJ/m2K]		113,63 67,01		Costante di tempo				τ [h]		225,79	
Capacità termica areica lato esterno				Cep(2007) [kJ/m2K]		11,79 11,14									
Fattore di smorzamento superficiale interno				fsd [-]		0,370 0,898									
Parete disperdente				fsi [-]		0,367 0,895									
Parete interna															
Dati acustici				Stratigrafia del componente edilizio											
Indice potere fonoisolante				Rw (dB) [dB]		47,80									
Rapporto tecnico UNI															
Laboratori italiani															
Formula CEN															
Altre formule															
Pareti monostrato															
In laterizio alleggerito															
In laterizio															
In blocchi di argilla espansa															
Pareti doppie															
In laterizio, interc. > 5 cm con materiale fibroso															
In blocchi di argilla espansa, interc. senza materiale fibroso															
Solai															
Solai in laterocemento															
Indice livello rumore da calpestio equivalente				Lnw,eq [dB]		-									

E' vietato l'uso del codice per la creazione di software commerciali senza autorizzazione

CC BY NC SA Questo/a opera è pubblicato sotto una Licenza Creative Commons.

N.B.: L'autore non è responsabile dell'uso del software e declina ogni responsabilità per eventuali conseguenze dirette, indirette o accidentali

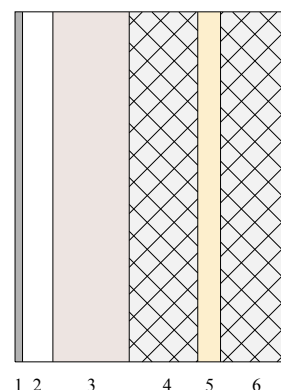
[Fig.107] Foglio di calcolo della trasmittanza termica periodica dell'involucro proposto per l'efficientamento dell'edificio scolastico campione mediante strato isolante AAM (UNI EN ISO 13786).

ANALISI TERMOIGROMETRICA CON SOFTWARE *GEMAVAP 4.3*

OGGETTO: PROGETTO DI RECUPERO DELL'INVOLUCRO DELLA SCUOLA MEDIA "DOZZA" (BOLOGNA)

DESCRIZIONE STRUTTURA:

DATI GENERALI	
Spessore	0,360 m
Massa superficiale	264,09 kg/m ²
Resistenza	3,5587 m ² K/W
Trasmittanza	0,2810 W/m ² K
PARAMETRI DINAMICI	
Fattore di attenuazione	0,1053
Sfasamento	12h 57'



	TIPO DI MATERIALE	MATERIALE	SPESSORE [m]	MASSA SUPERFICIALE [kg/m ²]	RESISTENZA [m ² K/W]	SPESSORE EQUIVALENTE D'ARIA [m]
		Superficie esterna			0,0400	
1	VAR	Rivestimento polimerico	0,010	27,00	0,0333	10.000,000
2	VAR	Camera debolmente ventilata sp.mm.40	0,040	0,04	0,0900	0,040
3	VAR	Isolante in Geopolimero - AAM	0,100	20,00	2,0000	0,500
4	CLS	CLS generico	0,090	108,00	0,1915	5,400
5	ISO	GEMATHERM X3 30mm - lastre di polistirene espanso estruso a Norma EN ISO13164	0,030	1,05	0,8824	6,000
6	CLS	CLS generico	0,090	108,00	0,1915	5,400
		Superficie interna			0,1300	

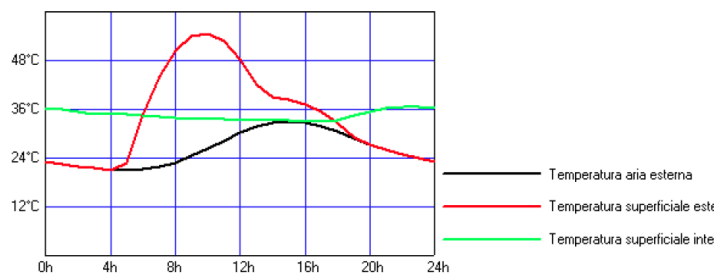
DATI CLIMATICI	
Provincia	Bologna
Comune	Bologna
Gradi giorno	2.259
Zona	E
Irradianza media mensile nel mese di massima insolazione	296 W/m ²

VALORI LIMITE NORMATIVA	
STRUTTURA REGOLAMENTARE SECONDO D.LGS N. 311	
Trasmittanza massima	0,46 W/m ² K
Trasmittanza massima dal 2008	0,37 W/m ² K
Trasmittanza massima dal 2010	0,34 W/m ² K
Trasmittanza della struttura	0,2810 W/m ² K

CALCOLO DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA ESTIVA:

FRONTE CONSIDERATO	
Orientamento	SE
Colore della superficie esterna	Medio

ORA	TEMPERATURA ARIA ESTERNA [°C]	IRRADIANZA [W/m ²]	TEMPERATURA SUPERFICIALE ESTERNA [°C]	TEMPERATURA SUPERFICIALE INTERNA [°C]
1	22,6	0	22,56	35,94
2	22,0	0	21,96	35,27
3	21,5	0	21,48	34,94
4	21,1	0	21,12	34,89
5	21,0	38	22,69	34,77
6	21,2	300	34,57	34,57
7	21,8	499	44,02	34,29
8	22,9	620	50,48	33,93
9	24,5	665	54,04	33,73
10	26,3	639	54,68	33,59
11	28,3	549	52,72	33,47
12	30,2	408	48,37	33,37
13	31,7	232	41,99	33,29
14	32,6	140	38,86	33,23
15	33,0	121	38,38	33,16
16	32,6	103	37,22	33,11
17	31,8	79	35,31	33,07
18	30,5	48	32,61	33,24
19	28,9	7	29,23	34,49
20	27,4	0	27,36	35,49
21	26,0	0	26,04	36,17
22	24,8	0	24,84	36,54
23	23,9	0	23,88	36,61
24	23,2	0	23,16	36,40



VERIFICA DELLA CONDENSA SUPERFICIALE:

CONDIZIONI ESTERNE E INTERNE				
MESE	TEMPERATURA ESTERNA [°C]	PRESSIONE ESTERNA [Pa]	TEMPERATURA INTERNA [°C]	PRESSIONE INTERNA [Pa]
ottobre	14,90	1.261	20,00	1.636
novembre	8,70	956	20,00	1.636
dicembre	4,00	700	20,00	1.636
gennaio	2,10	636	20,00	1.636
febbraio	4,60	736	20,00	1.636
marzo	9,40	847	20,00	1.636
aprile	14,20	1.084	20,00	1.636
maggio	18,20	1.418	20,00	1.636
giugno	22,90	1.806	20,00	1.636
luglio	25,40	1.835	20,00	1.636
agosto	24,90	1.904	20,00	1.636
settembre	21,20	1.611	20,00	1.636

FATTORE DI TEMPERATURA			
MESE	PRESSIONE DI SATURAZIONE INTERNA [Pa]	TEMPERATURA MINIMA SUPERFICIALE [°C]	FATTORE DI TEMPERATURA
ottobre	2.045	17,86	0,5805
novembre	2.045	17,86	0,8107
dicembre	2.045	17,86	0,8663
gennaio	2.045	17,86	0,8805
febbraio	2.045	17,86	0,8611
marzo	2.045	17,86	0,7982
aprile	2.045	17,86	0,6312

VERIFICA REGOLARITÀ STRUTTURA	
Mese critico	gennaio
Fattore di temperatura	0,8805
Resistenza minima accettabile	2,0918 m²K/W
Resistenza totale dell'elemento	3,5587 m²K/W
STRUTTURA REGOLAMENTARE	

VERIFICA DELLA CONDENSA INTERSTIZIALE:

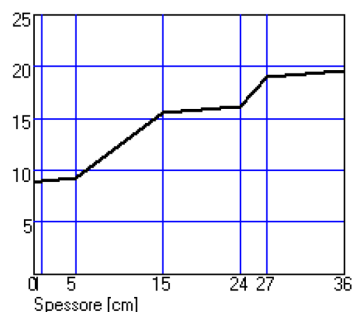
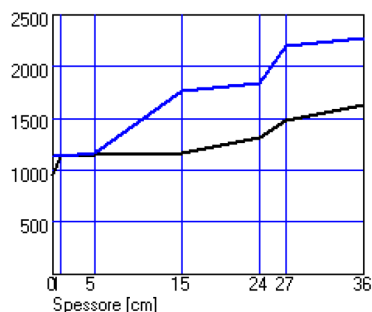
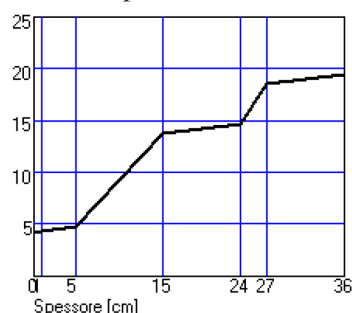
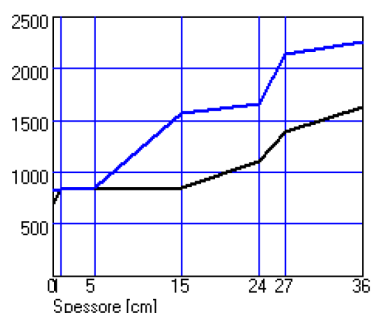
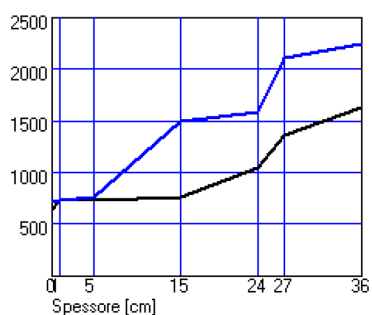
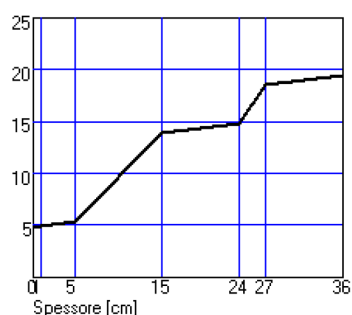
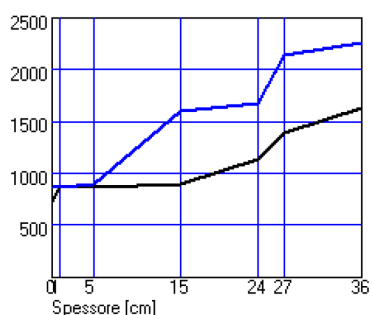
	1 - VAR	2 - VAR	3 - VAR	4 - CLS	5 - ISO	6 - CLS	
SUP. EST.	INTERF. 1	INTERF. 2	INTERF. 3	INTERF. 4	INTERF. 5	SUP INT.	

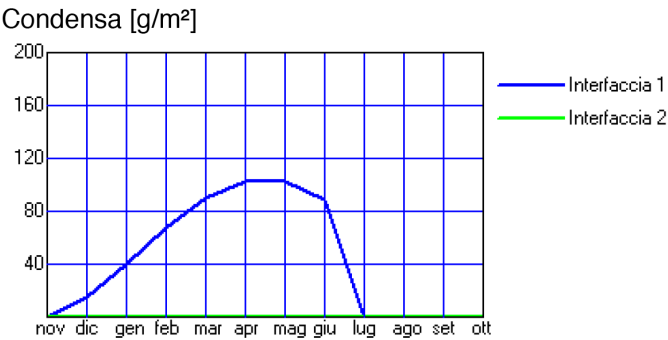
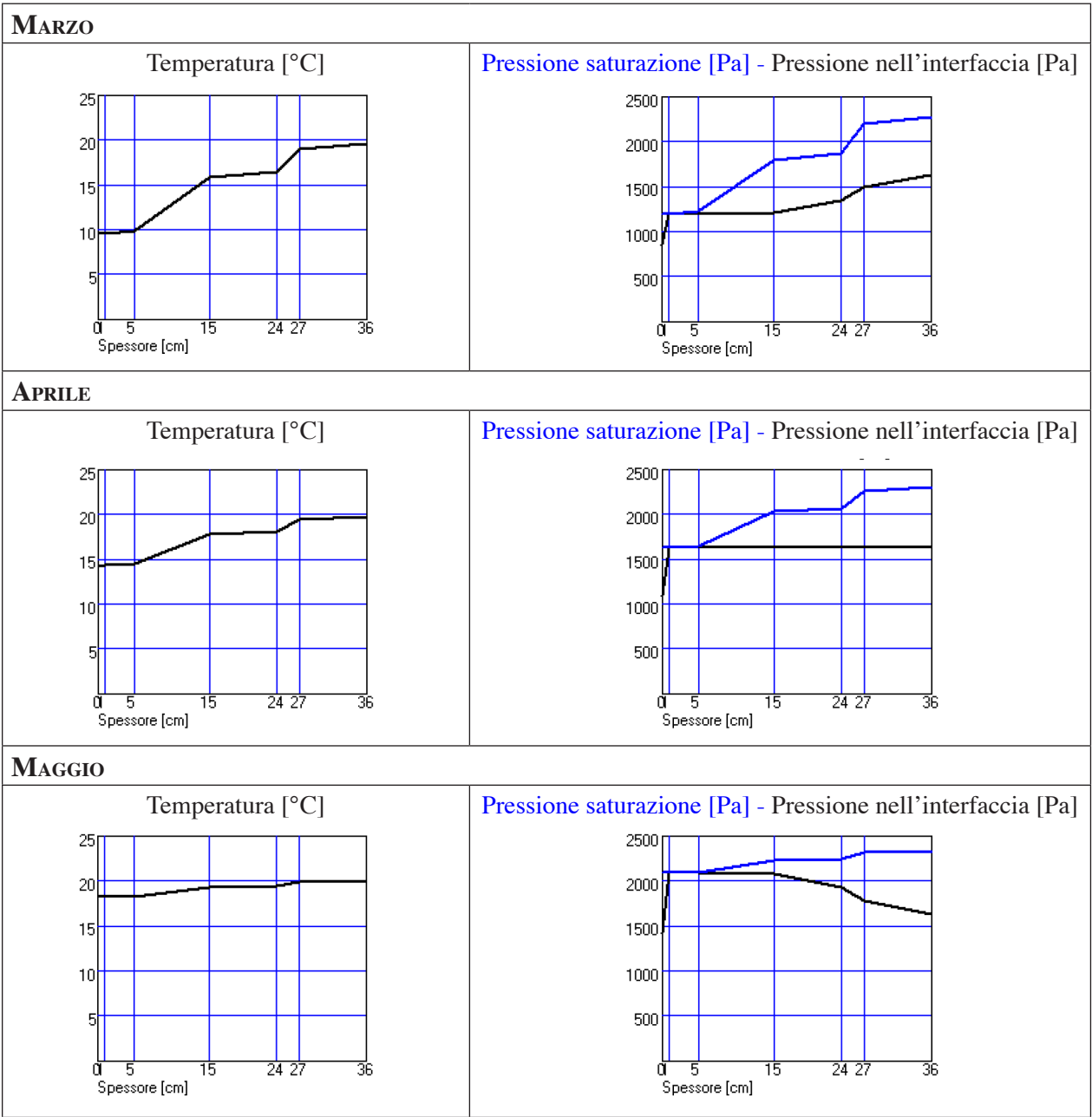
Pressione di saturazione [Pa]

Pressione nell'interfaccia [Pa]

Presenza di condensa

MESE	SUP. ESTERNA	INTERFACCIA 1	INTERFACCIA 2	INTERFACCIA 3	INTERFACCIA 4	INTERFACCIA 5	SUP. INTERNA
ottobre	1.700	1.705	1.719	2.063	2.099	2.271	2.310
ottobre	1.261	1.635	1.635	1.635	1.635	1.636	1.636
novembre	1.134	1.142	1.165	1.768	1.838	2.193	2.278
novembre	956	1.142	1.143	1.158	1.311	1.482	1.636
dicembre	823	832	856	1.570	1.660	2.136	2.254
dicembre	700	832	834	857	1.107	1.385	1.636
gennaio	721	729	753	1.495	1.592	2.113	2.244
gennaio	636	729	731	758	1.040	1.354	1.636
febbraio	858	867	891	1.594	1.682	2.143	2.257
febbraio	736	867	869	891	1.130	1.396	1.636
marzo	1.188	1.196	1.218	1.799	1.866	2.202	2.282
marzo	847	1.196	1.197	1.210	1.347	1.499	1.636
aprile	1.625	1.631	1.647	2.028	2.068	2.262	2.306
aprile	1.084	1.631	1.631	1.631	1.633	1.634	1.636
maggio	2.092	2.094	2.100	2.237	2.250	2.314	2.327
maggio	1.418	2.094	2.093	2.080	1.937	1.778	1.636
giugno	2.785	2.781	2.768	2.507	2.483	2.375	2.352
giugno	1.806	2.781	2.760	2.507	2.227	1.916	1.636
luglio	3.230	3.221	3.195	2.661	2.615	2.408	2.366
luglio	1835	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
agosto	3.137	3.128	3.105	2.630	2.588	2.402	2.363
agosto	1.904	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
settembre	2.514	2.512	2.508	2.406	2.396	2.353	2.343
settembre	1.611	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636

GRAFICI RELATIVI AI MESI CRITICI**NOVEMBRE****Temperatura [°C]****Pressione saturazione [Pa] - Pressione nell'interfaccia [Pa]****DICEMBRE****Temperatura [°C]****Pressione saturazione [Pa] - Pressione nell'interfaccia [Pa]****GENNAIO****Temperatura [°C]****Pressione saturazione [Pa] - Pressione nell'interfaccia [Pa]****FEBBRAIO****Temperatura [°C]****Pressione saturazione [Pa] - Pressione nell'interfaccia [Pa]**



CONDENSA ACCUMULATA				
	INTERFACCIA 1		INTERFACCIA 3	
MESE	FLUSSO DI VAPORE [kg/m ²]	CONDENSA ACCUMULATA [kg/m ²]	FLUSSO DI VAPORE [kg/m ²]	CONDENSA ACCUMULATA [kg/m ²]
ottobre	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
novembre	0,0147	0,0147	0,0000	0,0000
dicembre	0,0248	0,0396	0,0000	0,0000
gennaio	0,0280	0,0676	0,0000	0,0000
febbraio	0,0215	0,0890	0,0000	0,0000
marzo	0,0136	0,1026	0,0000	0,0000
aprile	0,0001	0,1027	0,0000	0,0000
maggio	-0,0142	0,0885	0,0000	0,0000
giugno	-0,2633	0,0000	-0,0269	0,0000
luglio	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
agosto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
settembre	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CONDENSA PRESENTE MA INFERIORE AL LIMITE (500 g/m ²)				

(Relazione di calcolo delle proprietà termoigrometriche eseguita con il software GemaVap 4.3)

In conclusione, si dimostra che l'applicazione della soluzione innovativa di involucro proposta, fondata sulla giustapposizione di un pannello coibente e massivo, a base di AAM, abbinato a una microcamera d'aria debolmente ventilata, consente di ottenere un effettivo miglioramento prestazionale energetico dell'involucro edilizio esistente, nel rispetto dei valori di trasmittanza e di comfort termoigrometrico prescritti dalla normativa vigente.

III.2.3 SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA E PROTOTIPAZIONE

Una prima prototipazione viene svolta relativamente a una delle prime tre soluzioni di involucro, denominata *Honeycomb* che, pur costituendo soltanto una prima idea progettuale per un sistema di recupero dell'involucro edilizio, si è dimostrata essere di particolare interesse architettonico e strutturale. Durante la prima fase di studio e progettazione, infatti, si avverte la necessità di sviluppare una prima prototipazione dell'oggetto, esplorando così anche le possibilità offerte dalle tecnologie CAD-CAM, oggetto di sperimentazione.

La prototipazione in scala 1:5 dei componenti di facciata consente inoltre di effettuare una prima verifica del sistema di messa in opera e di assemblaggio dei moduli finora concepiti, nell'ottica di un processo integrato che conferisca sempre maggiore importanza alla progettazione, a vantaggio di una ottimizzazione delle operazioni da svolgere in cantiere, in termini di tempo e risorse. Gli esiti prodotti da questa prima prototipazione sono stati presentati in occasione del *CESB13 - Central Europe towards Sustainable Building 2013*, tenuta a Praga²⁵.

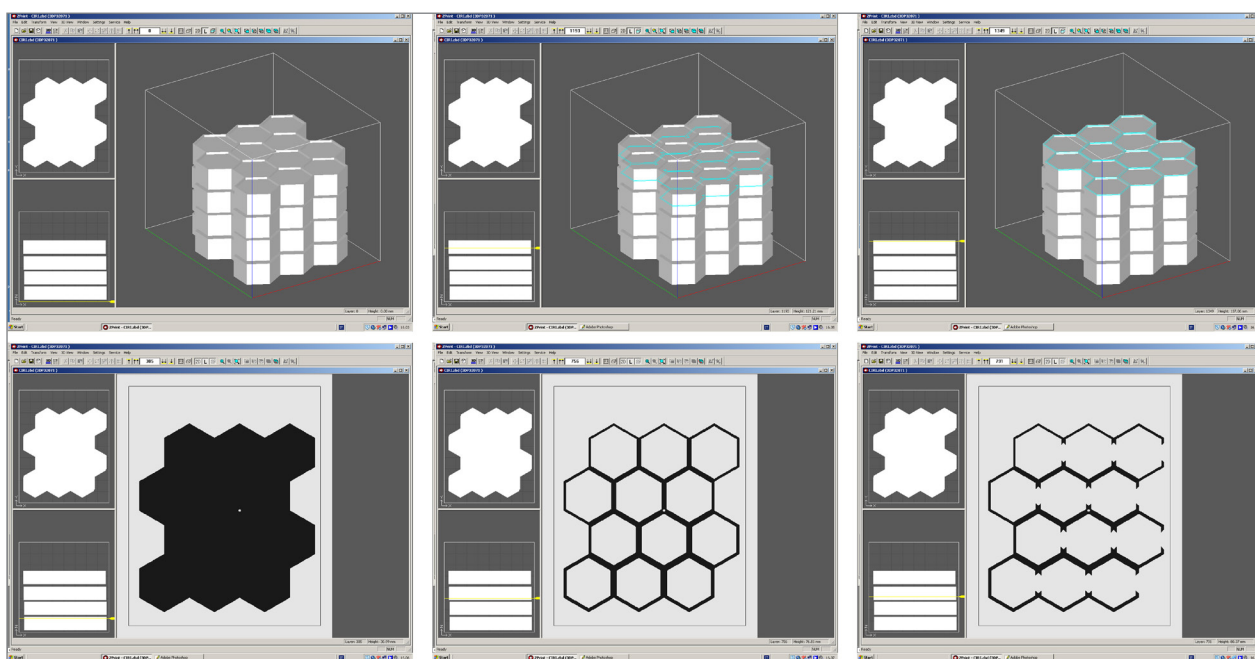
La prototipazione rapida svolta durante questa prima fase progettuale rappresenta una tecnologia innovativa che, in poche ore, rende possibile la produzione di oggetti tridimensionali a geometria complessa, direttamente ottenibili dal loro modello matematico, realizzato tramite software di modellazione CAD.

Tra le varie tecnologie di prototipazione attualmente disponibili, le stampanti 3D si distinguono principalmente per diversa velocità di stampa e applicabilità, oltre che per le modalità di realizzazione degli strati (*layer*) costituenti il prodotto finale. In particolare, il prototipo realizzato è creato con un modello di *3D Printer* che lavora per sovrapposizione di strati, mediante un ugello che rilascia strati uniformi (spessore di 0,08-0,1 mm) di polvere di gesso sul piano di costruzione, depositando un apposito legante sulle parti che andranno a costituire il modello finale [Fig. 109]. Successivamente, la polvere in eccesso viene rimossa, e il modello viene immerso in un bagno di resina epossidica per alcune ore: tale sostanza penetra all'interno del modello a una profondità di circa 3 mm, conferendole così una superficie di finitura più lucida e liscia, oltre che una maggiore resistenza [Fig. 110].

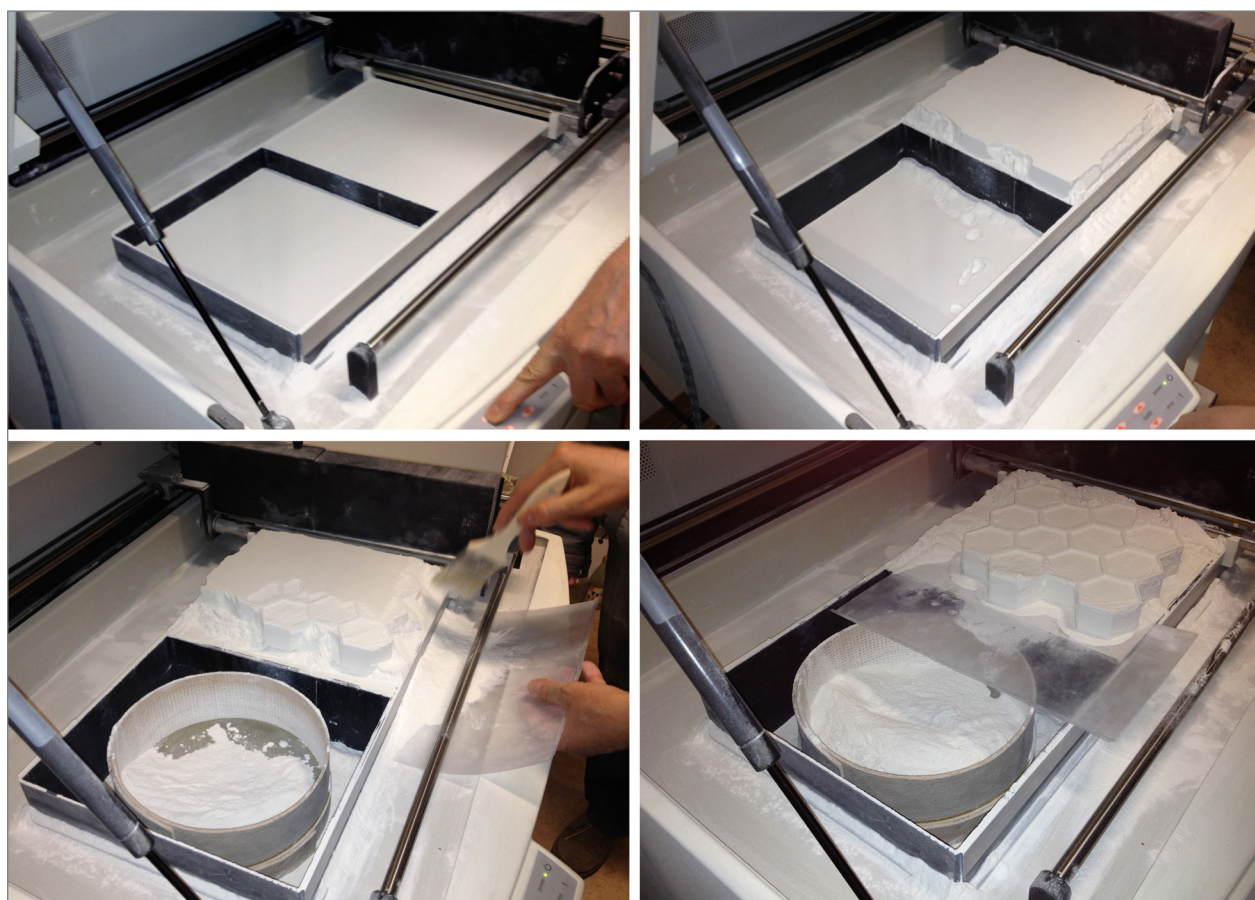
Soltanto questa tecnologia, basata su processi additivi (*additive manufacturing*) di deposito di materiale a strati successivi, consente di realizzare modelli di qualsiasi geometria: durante la lavorazione, infatti, la polvere in eccesso funge da supporto al modello stesso, evitando di ricorrere a supporti particolari durante la creazione.

La *3D Printer* usata durante il progetto di ricerca rappresenta una delle tecnologie attualmen-

25 Mazzoli C., Fusco O., Guardigli L., Gulli R., *Innovative materials and technologies for a new envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock*, in "CESB13 - Central Europe towards Sustainable Building 2013, 26th-28th June 2013, Prague, Czech Republic, Proceedings", Tiskarna PBtisk, Praga, giugno 2013, pp. 405-408.



[Fig. 108] Visualizzazione delle fasi di stampa del modello virtuale realizzato con *Rhinoceros+Grasshopper*, importato nel software *ZPrinter* di interfaccia con la *3D Pinter*: in evidenza la disposizione dei quattro moduli sovrapposti, al fine di ottimizzare il processo unico di stampa, e la variabilità delle sezioni.



[Fig. 109] Fasi del processo di stampa, con estrazione finale del modello e rimozione della polvere in eccesso.

te più comuni in ambito non industriale, per la sua economicità e rapidità. Si tratta di una stampante che consente di realizzare elementi di dimensioni massime 20x25x20 cm, limite che ha portato alla necessità di suddividere il prototipo in quattro moduli [Fig. 108], a simulazione delle reali operazioni di adeguamento alle macchine CNC di cui si dispone in ambito industriale per la realizzazione di elementi prefabbricati da trasportare e assemblare in opera, prima di effettuare il getto.

Per comprendere a fondo le potenzialità di questa tecnologia, è importante notare come, oltre al limite dimensionale dettato dalla stampante, non sussistano ulteriori vincoli teorici effettivi. Così come in altri ambiti (medicina, gioielleria, arte, design), anche in architettura le *3D Printer* sono progressivamente sempre più usate grazie alla continua riduzione dei costi, lasciando intravedere grandi potenziali per applicazioni future che, per le estese varietà di dimensioni, materiali, colori e texture, portano alla sempre maggiore diffusione di tali tecnologie anche in ambiti non industriali.

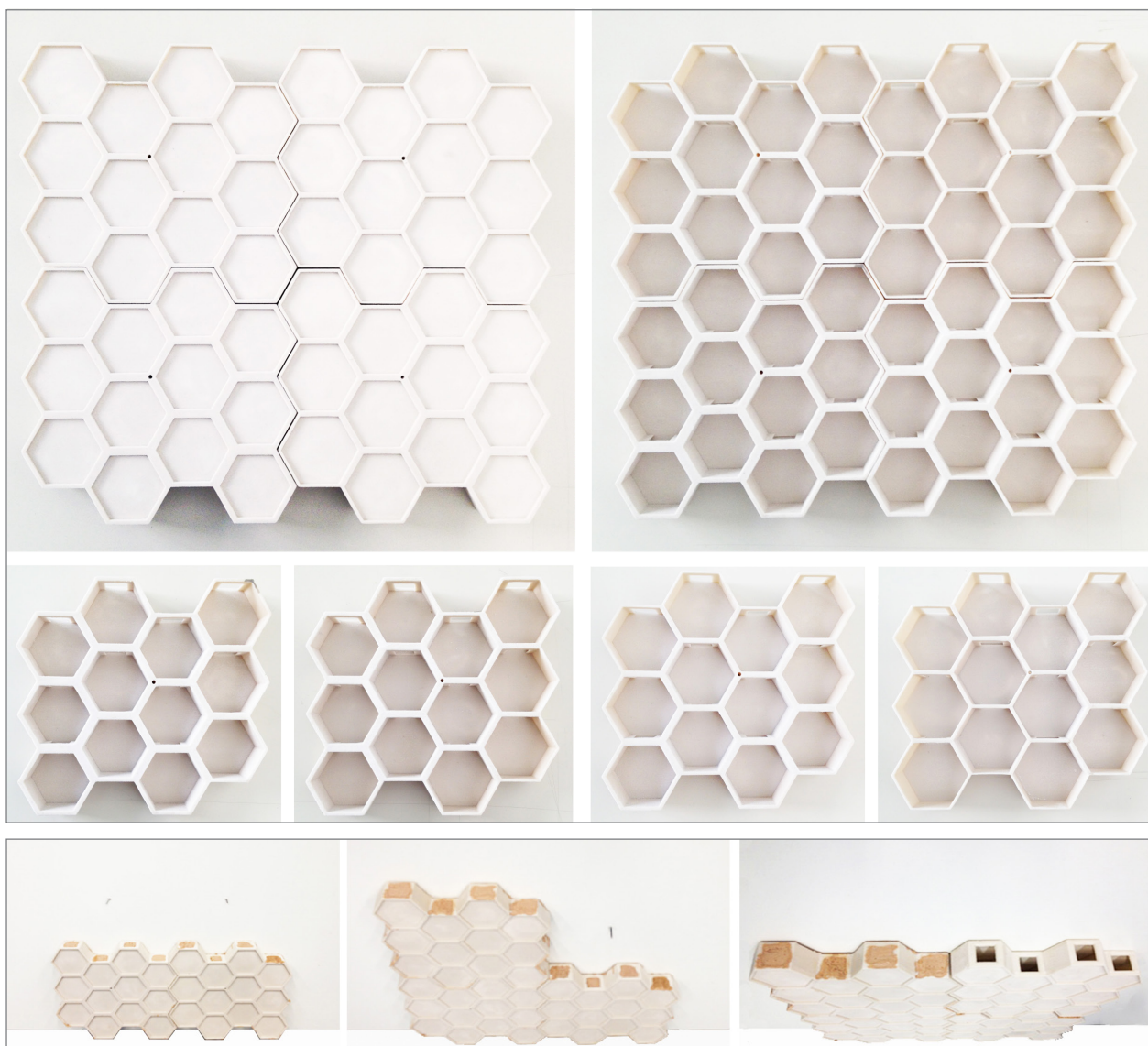
Come si vede da questo primo prototipo in scala, la conformazione geometrica a trama esagonale comporta un sistema di incastro tra i moduli assemblati che comporta una maggiore stabilità nel piano della facciata. In ogni caso, come rilevato nel paragrafo precedente, la normativa impone determinati vincoli relativi all'ancoraggio dei sistemi di isolamento a cappotto, nel rispetto dei requisiti di aderenza e resistenza all'azione del vento e alle sollecitazioni esterne orizzontali, così come all'eventuale scollamento e ribaltamento del pannello fuori dal piano. In rapporto a queste prescrizioni, si ipotizza un sistema di ancoraggio semplice, predisponendo per ogni modulo del modello tridimensionale un foro, collocato sul lato interno in una posizione baricentrica, in corrispondenza del vertice delle nervature centrali, al fine di alloggiare il perno di ancoraggio al pannello di supporto.

Una volta collocati i due moduli esagonali inferiori, si procede con il loro riempimento con un getto di malta geopolimerica, colata dall'alto, a simulazione della fase umida di getto svolta in cantiere [Fig. 111]. Già da questa prima prototipazione emergono le problematiche relative alle modalità di esecuzione del getto di materiale geopolimerico. Secondo la primaria concezione del sistema, i pannelli prefabbricati fungono da cassaforma a perdere e vengono riempiti dall'alto con un getto di malta geopolimerica: il materiale isolante viene immesso all'interno delle celle esagonali attraverso le forature predisposte alla sommità del pannello, riempiendo interamente tutte le celle grazie alle bucatore che mettono in comunicazione ogni colonna di esagoni costituente il pannello. Questo procedimento, ipotizzato preliminarmente per essere svolto in cantiere, comporta alcune criticità legate non soltanto alla adeguata viscosità del materiale per consentire il passaggio agevole del getto attraverso i fori, ma in particolar modo ai tempi di presa e indurimento del materiale isolante che porterebbero a un rallentamento della posa in opera.

In un'ottica sostenibile degli interventi di recupero, un sistema costruttivo di questo tipo, basato sulla combinazione di una tecnica a secco per l'assemblaggio di pannelli prefabbricati con una tecnica a umido per il getto del materiale isolante, non risponde ai paradigmi di ricerca.

L'insieme delle considerazioni svolte orienta le ricerche verso l'elaborazione di un altro sistema costruttivo interamente a secco che, in definitiva, riesca ad adempiere a tutte le istanze richieste, nel rispetto dei principi di sostenibilità, intesa come reversibilità, flessibilità, recupero e riutilizzo di tecniche e materiali a basso impatto ambientale.

Il sistema elaborato successivamente, dal nome *G-SKinnED*, conserva la suddivisione in



[Fig. 110] Modello della struttura in gesso e resina, realizzato con la *3D Printer*: fronte e retro dell'intero sistema; quattro moduli distinti costituiti da celle esagonali di lato 3 cm. Le dimensioni e lo spessore delle nervature che delimitano le celle esagonali variano in funzione della geometria della facciata esistente, e dei requisiti prestazionali richiesti dalla normativa e dalle esigenze dell'utenza.

[Fig. 111] Simulazione della fase di completamento della struttura *Honeycomb*: procedendo per file orizzontali di pannelli, posati dal basso verso l'alto, la struttura viene integrata con il getto di materiale isolante a base ceramica, colato verticalmente dall'alto, attraverso le aperture predisposte nel modello.

pannelli prefabbricati, caratterizzati da una struttura a trama esagonale, realizzati in materiale plastico polimerico, leggero e resistente, grazie all'impiego di *3D Printer* per la stampa di modelli digitali CAD. Inoltre, ogni pannello prefabbricato a trama esagonale estrusa conserva il suo duplice ruolo di conferire rigidità per forma alla struttura bidimensionale, e di fungere da cassaforma a perdere per il contenimento del getto di materiale isolante plastico.

A differenza del superato sistema costruttivo, vengono eliminate le forature sul lato superiore delle celle esagonali, in quanto il riempimento con il materiale isolante avviene durante la fase precantiere, gettando la malta geopolimerica AAM all'interno del pannello disposto orizzontalmente. In questo modo i pannelli prefabbricati sono pronti per essere trasportati in cantiere ed essere assemblati a secco, comportando notevoli benefici in termini di risparmio dei tempi di posa e di pulizia del cantiere: questi fattori rappresentano due elementi fondamentali in relazione ai caratteri di sostenibilità di un intervento.

Per sperimentare questo tipo di soluzione innovativa in scala reale occorre in prima istanza conoscere precisamente i dati relativi alle caratteristiche fisiche del materiale, alle proprietà di plasticità e lavorabilità, e alle prestazioni termiche e meccaniche in funzione delle diverse formulazioni proposte. Infatti, in una fase successiva di ricerca, si prevede l'aggiunta di diversi aeranti al composto, al fine di conferire una struttura alveolare alla malta geopolimerica e dunque di alleggerire e migliorarne le prestazioni termiche, grazie all'elevata percentuale di microbolle d'aria.

In vista delle possibili applicazioni del materiale geopolimerico nell'ambito dei sistemi di involucro, la prototipazione svolta durante questa fase della ricerca è volta ad approfondire ulteriormente le primarie sperimentazioni che hanno portato alla prima formulazione del materiale AAM (non alveolato) che presenta la composizione riportata nella tabella seguente²⁶:

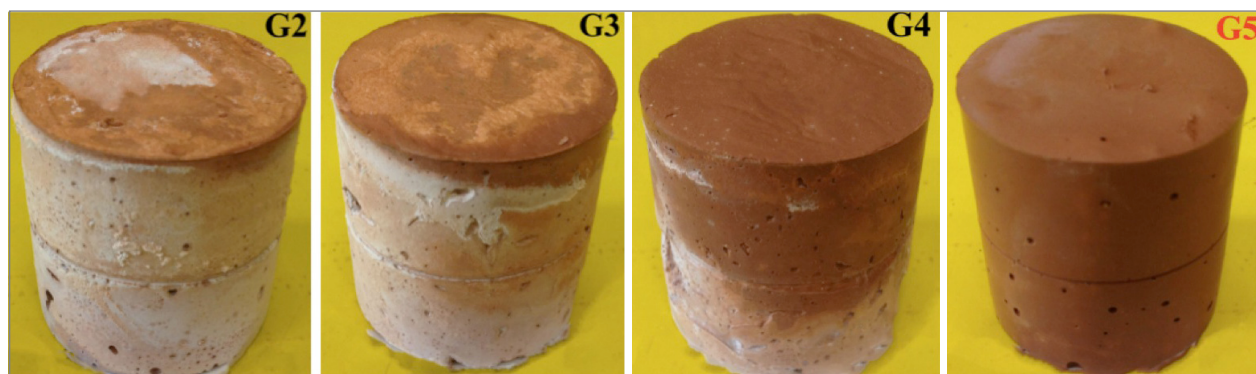
AAM - ALKALI ACTIVATED MATERIAL (QUANTITÀ PER REALIZZARE UN VOLUME $V = 1 \text{ m}^3$)		
SOLUZIONE	QUANTITÀ	UNITÀ DI MISURA
Argilla cotta in polvere BWP - Brick Waste Powder (derivata da sfridi di lavorazione del laterizio)	1.322,9	[kg]
Silicato di Sodio in soluzione Na_2SiO_3	392,9	[kg]
Idrossido di Sodio in soluzione 8M NaOH	217,1	[l]
α -Allumina Al_2O_3	88,6	[kg]
Acqua distillata H_2O	54,3	[l]

²⁶ Queste formulazioni sono svolte nell'ambito della ricerca di laboratorio diretta dal Dott. Fusco O., in collaborazione tra il DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna e l'Unità Operativa 3 - Recupero e Restauro del CIRI Edilizia e Costruzione dell'Università di Bologna, sotto la direzione rispettivamente del Prof.ssa Bignozzi e dei Prof. Gulli e Guardigli.

Per giungere a questa formulazione chimica, lo svolgimento di numerosi saggi è volto a valutare le proprietà della pasta geopolimerica ottenuta, mantenendo costante la quantità di polvere di laterizio e di Idrossido di sodio, e variando il contenuto di Silicato di sodio, Allumina e acqua distillata. In particolare, vengono realizzati sei campioni (G1-G6), a partire dallo stesso quantitativo di materia prima ceramica, pari a 120,0 g:

AAM	BWP [g]	Na_2SiO_3 [g]	8M NaOH [g]	Al_2O_3 [g]	H_2O [g]	TOTALE [g]
G1	120,0	2,0	20,0	22,8	26,5	191,3
G2	120,0	11,0	20,0	18,9	21,4	191,3
G3	120,0	15,0	20,0	17,1	19,2	191,3
G4	120,0	20,0	20,0	15,0	16,3	191,3
G5	120,0	23,3	20,0	13,5	14,5	191,3
G6	120,0	34,7	20,0	8,5	8,1	191,3

Da ognuna delle sei paste AAM testate si ottiene un campione cilindrico di dimensioni standardizzate ($H \times D = 47,50 \times 48,00$ mm), su cui svolgere la misurazione della resistenza a compressione R_{compr} [MPa]. I campioni vengono lasciati a maturare per un giorno in un ambiente caratterizzato da una temperatura ambiente $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e un'umidità relativa $R.H. = 40 \pm 2\%$, per poi essere sformati e lasciati maturare per altri sei giorni alle stesse condizioni climatiche. È importante rilevare che tutti i campioni raggiungono un totale essiccamento e indurimento nell'arco della prima giornata.



[Fig. 112] Campioni cilindrici realizzati gettando le paste geopolimeriche G1, G2, G3, G4, caratterizzate da un diverso contenuto di Silicato di sodio, Allumina e acqua distillata: in particolare, si osservano le notevoli differenze in termini di formazione di efflorescenze che si presentano significative per il campione G2, medie per i campioni G3 e G4 e assenti per il campione G5 che, considerando la totalità dei fattori, risulta la formulazione migliore.

Al termine di questo periodo, sono valutate alcune delle proprietà del materiale, considerate fondamentali per determinare quale delle formulazioni fornisca l'AAM dal comportamento ottimale in termini di lavorabilità, proprietà meccaniche e resistenza al degrado e alla formazione di efflorescenze [Fig. 112].

AAM	$\text{Na}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ [mol*mol ⁻¹]	PASTA FRESCA	PASTA INDURITA		
		LAVORABILITÀ ^(a)	ASSORBIMENTO DELL'ACQUA ^(b) [%]	PERDITA PESO NEL PROCESSO DI INDURIMENTO [%]	EFFLORESCENZE ^(c)
G1	0,77	1	27,4	14,0	4
G2	0,94	1	26,7	13,2	3
G3	1,02	2	26,2	12,6	2
G4	1,12	3	24,6	11,8	2
G5	1,18	4	20,6	10,5	0
G6	1,40	4	20,9	8,6	1

NOTE:

^(a) Valutazione visiva: bassa (1); media (2); buona (3); molto buona (4).

^(b) Secondo la norma UNI EN 771, il valore accettabile di assorbimento dell'acqua è compresa tra 14% e 25%.

^(c) Secondo la norma UNI 8942, le efflorescenze vengono valutate visivamente:

- leggero strato bianco sulla superficie del campione (1);
- spesso strato bianco sulla superficie del campione (2);
- cristalli visibili sulla superficie (3);
- efflorescenze significative con dispersione di polvere (4).


Dalle analisi numeriche svolte nell'ambito di questa sperimentazione costruttiva si nota come le proprietà del materiale dipendano strettamente dal variare del rapporto $\text{Na}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. In particolare, all'aumentare di questo rapporto Sodio/Alluminio si osserva un aumento del peso del materiale [%], una diminuzione della porosità totale [%] e una diminuzione della formazione delle efflorescenze.

Questo rapporto molare risulta determinante anche per la formazione dei pori, dal cui raggio r dipendono i fenomeni di condensazione capillare ($0,12 < r < 0,25 \mu\text{m}$), imbibizione capillare ($0,42 < r < 1,78 \mu\text{m}$) e permeabilità al vapore acqueo ($r > 10,00 \mu\text{m}$).

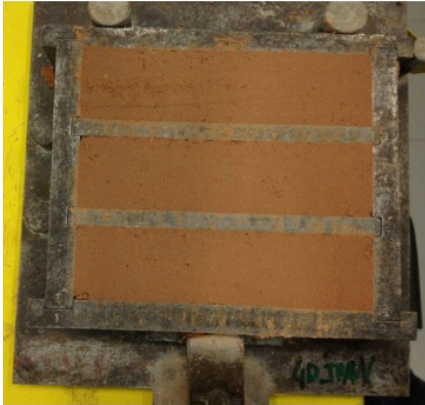
Sulla base di queste valutazioni e della considerazione della totalità dei fattori coinvolti, si può concludere che la formulazione migliore del materiale geopolimerico AAM risulta essere la G5, caratterizzata da un coefficiente molare $\text{Na}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ pari a 1,18.

Per questo tipo di AAM vengono svolte ulteriori prove, finalizzate alla più precisa definizione delle proprietà del materiale studiato, sotto forma di pasta e di malta, ossia senza e con aggiunta di sabbia normalizzata.

In particolare, per quanto riguarda le proprietà meccaniche della pasta geopolimerica, si osservano le seguenti proprietà verificate su provini standard di forma cilindrica:

PASTA GEOPOLIMERICA AAM		
PROPRIETÀ	DESCRIZIONE	VALORE
$\text{LIO}_{\text{TOT}}/\text{SOL}_{\text{TOT}} [\%]$	Rapporto tra la percentuale di materiale solido e liquido	27%
$\text{R}_{\text{CDRY}} [\text{MPa}]$	Resistenza a compressione, misurata su singoli campioni cilindrici a seguito della prova di assorbimento percentuale ($\text{WA}_{24\text{h}}$), ossia dopo essere stati 24h in assorbimento in acqua e dopo essere passati in stufa a 100°C per 24h. (Macchina Amsler–Wolpert, maximum load: 100 kN, spostamento costante 50 mm/min)	4,05 MPa
WORKABILITY [-]	Lavorabilità, valutata tramite esame visivo e tattile	sufficiente
AA [%]	Assorbimento percentuale di acqua, misurato tramite il test a 24h eseguito sul campione cilindrico asciugato in stufa per 24h a 100°C, poi immerso in acqua per 24h e asciugato nuovamente a 100°C per 24h	20,56%
$\rho_{\text{DRY}} [\text{g}/\text{cm}^3]$	Densità, misurata dopo aver fatto stagionare il campione per 7 giorni a temperatura ambiente, e a seguito della prova AA%	1,72 g/cm ³
$\phi [\%]$	Porosità totale, misurata attraverso il porosimetro a intrusione di mercurio Hg	32,48%
		

Per quanto riguarda invece le proprietà meccaniche della malta geopolimerica, ottenuta aggiungendo alle soluzioni sopra elencate una percentuale di sabbia normalizzata secondo la norma UNI EN 196-1, si osservano le seguenti proprietà fisico-meccaniche, relative ai travetti di dimensioni standard:

MALTA GEOPOLIMERICA AAM		
PROPRIETÀ	DESCRIZIONE	VALORE
$LIO_{TOT}/SOL_{TOT} [\%]$	Rapporto tra la percentuale di materiale solido e liquido	28%
$R_{FMEDIO_7GG} [MPa]$	Resistenza a flessione, calcolata come valore medio di 3 resistenze a flessione misurate su 3 campioni prismatici diversi, stagionati per 7 giorni alla temperatura ambiente (Macchina Amsler-Wolpert, maximum load:100 kN, spostamento costante 50 mm/min)	1,06 MPa
$R_{CMEDIO_7GG} [MPa]$	Resistenza a compressione, calcolata come la media di 5 valori di resistenze a compressione misurate su 5 campioni diversi a forma di prisma, derivanti dalla prova di resistenza a flessione, dopo essere stati stagionati per 7 giorni a temperatura ambiente (Macchina Amsler-Wolpert, maximum load:100 kN, spostamento costante 50 mm/min)	7,53 MPa
WORKABILITY [-]	Lavorabilità, valutata secondo la normativa UNI EN 196-1 relativa alla determinazione della classe di resistenza del cls	11 cm
AA [%]	Assorbimento percentuale di acqua, misurato tramite il test a 24h eseguito sul campione asciugato in stufa per 24h a 100°C, successivamente immerso in acqua per 24h, e asciugato nuovamente a 100°C per 24h	7,68%
$\rho_{DRY} [g/cm^3]$	Densità, misurata dopo aver fatto stagionare il campione per 7 giorni a temperatura ambiente, e a seguito della prova AA%	2,07 g/cm ³
$\phi [\%]$	Porosità totale, misurata attraverso il porosimetro a intrusione di mercurio Hg	18,40%
		

La sperimentazione costruttiva presentata all'interno di questo capitolo riguarda la realizzazione di prototipi volti alla verifica delle proprietà enunciate, nel duplice possibile impiego di termointonaco e di pannello di facciata. Sviluppi futuri della ricerca si focalizzano successivamente sullo studio della particolare integrazione della malta geopolimerica caratterizzata dalla formulazione ottimale, selezionata nel repertorio delle soluzioni verificate durante la presente sperimentazione costruttiva, all'interno di pannelli di facciata dotati delle caratteristiche geometriche proprie delle geometrie elaborate mediante la modellazione con software di progettazione parametrica.

In linea con i paradigmi di ricerca, la sperimentazione costruttiva svolta in collaborazione con il *CIRI Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna è principalmente volta all'esplorazione delle proprietà del materiale innovativo e delle modalità di posa in opera nell'ambito degli interventi di recupero del costruito, per l'efficientamento dell'involucro edilizio. La sperimentazione costruttiva procede alla valutazione quantitativa di tutti i parametri caratterizzanti il materiale studiato che, coerentemente con le istanze di ricerca, risulta inorganico, plastico, versatile, riciclato, ecosostenibile e a bassa energia inglobata.

L'obiettivo principale della sperimentazione riguarda la verifica delle proprietà della malta AAM ottenuta mediante il processo di attivazione alcalina di due materie prime a base di argilla, svolte a temperatura ambiente: l'argilla vergine proviene direttamente dalla cava, mentre la polvere di laterizio deriva da scarti di produzione ceramica²⁷. Inoltre, la sperimentazione prevede l'integrazione di agenti aeranti ed è volta a verificare le proprietà conseguite mediante l'aggiunta di tipi diversi di agenti aeranti: Bicarbonato di Sodio (NaHCO_3), Perossido di Idrogeno ($\text{H}_2\text{H}_2\text{O}$), agente chimico schiumogeno "Foamcem", e Anidride carbonica iniettata (CO_2). Il dosaggio di questi agenti varia in funzione dell'obiettivo fissato che consiste nell'ottenimento di un materiale isolante e leggero, portando la densità dal valore iniziale pari a $1,8 \text{ g/cm}^3$, corrispondente a una malta priva di agenti aeranti, a un valore finale pari a $0,2 \text{ g/cm}^3$, comparabile con quello presentato dagli isolanti attualmente in commercio.

²⁷ Il materiale è fornito da *Wienerberger (Building Material Solutions)*, una delle più importanti aziende produttrici di laterizio, che dal 2012 collabora con il *CIRI - Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna al progetto di recupero degli scarti di lavorazione per la formulazione di un materiale geopolimerico ecosostenibile a base ceramica.

III.2.4 VERIFICA DELLE TECNICHE DI MESSA IN OPERA E DEI REQUISITI PRESTAZIONALI

La sperimentazione costruttiva consente di mettere in luce le principali criticità e potenzialità presentate dal sistema costruttivo di involucro proposto dal progetto di ricerca. Il cantiere, infatti, rappresenta il luogo in cui le conoscenze teoriche e pratiche si incontrano, portando alla profonda comprensione e interiorizzazione dei processi costruttivi.

Per quanto riguarda la verifica della tecniche di messa in opera, si osservano immediatamente le differenze di applicazione e stesura della malta geopolimerica AAM, variabile al modificarsi del tipo di agente aerante impiegato, e si valutano le proprietà di lavorabilità nel duplice caso di un termointonaco e di pannelli prefabbricati isolanti.

Nel caso di un'applicazione della malta come termointonaco, i fattori da valutare riguardano le modalità di posa in opera e la necessità di inserire una microrete di armatura dello strato isolante, in rapporto all'eventuale formazione di setole e fessurazioni.

Nel secondo caso di produzione di un pannello in malta geopolimerica, invece, un importante parametro da valutare riguarda le tecniche di posa in opera mediante l'impiego di idonei sistemi di ancoraggio meccanico puntuale alla facciata esistente, in funzione delle caratteristiche del pannello correttamente posizionato e del tipo di supporto murario.

A proposito della primaria operazione da svolgere in cantiere, occorre rilevare che, prima di procedere alla posa dei pannelli di isolamento termico per la riqualificazione energetica dell'involucro, naturalmente, occorre effettuare una bonifica della muratura perimetrale dell'edificio esistente oggetto di intervento.

Nel particolare caso di studio presentato dalla ricerca, si ipotizza di intervenire su edifici costituiti da una struttura a telaio puntiforme e da pannelli prefabbricati di tamponamento in conglomerato cementizio armato. Per questo tipo di strutture in cemento armato, occorre procedere a un'accurata operazione di pulizia superficiale per rimuovere le parti incoerenti, il degrado superficiale e qualsiasi traccia di polvere, olio, grasso e sporco in genere.

Inoltre, qualora il calcestruzzo risulti degradato, presentando zone in cui i ferri sono corrosi e il copriferro delaminato o addirittura espulso, occorre procedere preventivamente a un intervento di ripristino che prevede l'asportazione del calcestruzzo degradato, la pulizia del ferro d'armatura mediante spazzolatura meccanica, una fase di sabbiatura o idropulizia, la protezione della barra mediante l'applicazione di malte cementizie passivanti e anticorrosive, la ricostruzione della sezione mediante l'impiego di malte a ritiro compensato. Dopo questo eventuale intervento di ricostruzione, occorre attendere il termine del periodo necessario di maturazione del supporto, prima di proseguire con la posa dei pannelli prefabbricati isolanti per la realizzazione del secondo involucro edilizio.

Soltanto in seguito allo svolgimento di queste operazioni di bonifica della muratura perime-

trale esistente del fabbricato oggetto di intervento, è possibile procedere con la posa in opera dei pannelli isolanti, mediante la successiva tassellatura del pannello secondo le indicazioni fornite dalla normativa.

Le prerogative sulla validità delle soluzioni tecniche esplorate per la riqualificazione architettonica dell'esistente, mediante l'incremento delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio, riguardano principalmente i seguenti parametri:

- efficienza ed efficacia dell'intervento, valutata in relazione agli standard energetici e all'analisi costi-benefici relativa all'intervento specifico ipotizzato;
- compatibilità ambientale di materiali e componenti, in termini di proprietà fisiche dei materiali e dell'emissione di anidride carbonica che caratterizza il loro processo di produzione, posa in opera, vita utile e dismissione;
- sostenibilità dei materiali e dei componenti, in termini di impatto ambientale e di risorse economiche, in relazione all'energia grigia inglobata e alla possibilità di inserimento del materiale all'interno di una filiera di recupero selettivo e riciclaggio;
- figurazione architettonica e design di facciata, in termini di strategie di riqualificazione architettonica, valutate e definite nel rispetto del valore storico ed estetico dei fabbricati esistenti
- durabilità e caratteristiche di invecchiamento e degradazione dei materiali impiegati costituenti l'involucro edilizio;
- rapidità e facilità di messa in opera, in relazione alle operazioni di montaggio e smontaggio;
- variabilità e flessibilità geometrica e dimensionale del costruito.

Oltre alla valutazione di questi fattori, al termine delle sperimentazioni risulta fondamentale svolgere alcune misurazioni per concludere l'esperienza di prototipazione e per ottenere i dati sperimentali da confrontare con quelli ottenuti in via teorica, mediante le simulazioni con software di analisi termica in regime stazionario e in regime periodico stabilizzato.

Pertanto, al fine di caratterizzare il materiale e di determinare l'impiego ottimale delle malte AAM sperimentate, caratterizzate da differenti formulazioni, variabili per tipo di agente aerante impiegato, sui prototipi realizzati occorre svolgere la misurazione dei seguenti parametri:

- densità d [g/cm^3];
- lavorabilità W ;
- calore specifico c_s ;
- conducibilità termica λ [W/mK], con camera termica e termoflussimetro;
- trasmittanza termica U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], variabile a seconda dello spessore del pannello;
- trasmittanza termica periodica Y_{IE} [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], variabile a seconda dello spessore del pannello;
- capacità termica areica C_{IP} [$\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$];
- porosità, mediante test di porosimetria con intrusione di Hg [-];

- assorbimento percentuale, mediante test di imbibizione [%];
- coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ [-];
- resistenza meccanica a compressione R_c [MPa].

Sulla base delle valutazioni svolte in merito alle proprietà fisiche e termiche del materiale isolante individuato, è possibile elaborare una soluzione di involucro efficace ed efficiente, che risponda alle esigenze prestazionali dell'edificio esistente oggetto di intervento. Il riconoscimento dell'eterogeneità morfologica e tipologico-costruttiva del costruito e della variabilità delle condizioni contestuali, climatiche ed ambientali, che caratterizzano l'ambiente esterno in cui il fabbricato è inserito rappresentano le primarie problematiche poste dall'adeguamento del patrimonio edilizio recente agli standard energetici fissati dall'attuale normativa.

Parte II - Analisi e progetto
Partie II - Analyse et Projet

IV. Un caso di studio. Il patrimonio edilizio scolastico a Bologna
Un étude de cas. Le patrimoine bâti scolaire de Bologne

IV.1 EDILIZIA SCOLASTICA

Al fine di fornire un quadro completo del patrimonio edilizio scolastico di Bologna, si vogliono ripercorrere le fasi principali storico-sociali che hanno contribuito allo sviluppo di questa categoria di edifici, in relazione all'evoluzione legislativa dell'epoca del secondo dopoguerra e alle politiche di intervento adottate dal Comune di Bologna per rispondere alle esigenze.

Si procede inoltre a fornire una classificazione delle scuole secondarie di primo grado diffuse nel territorio comunale bolognese (sotto forma di quadro sinottico dei trenta edifici oggetto di studio), provvedendo a delinearne le principali caratteristiche tipologico-distributive e tecnico-costruttive e ad analizzare criticamente alcune esperienze progettuali particolarmente significative.

IV.1.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO DELLA TEMATICA

La forte espansione urbana dagli anni Cinquanta ha prodotto prevalentemente edilizia residenziale, rimandando continuamente la realizzazione di quei servizi che rendono civile e qualitativa l'espansione stessa. La mancanza di edifici scolastici e lo stato di obsolescenza di quelli esistenti, peraltro sovrautilizzati da doppi e tripli turni, rappresenta la situazione italiana durante gli anni precedenti la Legge n. 641 del 1967 che, votata dal Parlamento, avrebbe dovuto superare la crisi dell'edilizia scolastica. Tale legge, infatti, impegnava lo Stato a realizzare gli ambienti necessari all'obbligatorietà degli studi per i ragazzi dai 6 ai 14 anni. I finanziamenti varati durante il corso degli anni successivi alla Legge del 1967 furono insufficienti, giunsero a scadimento o comunque non vennero mai portati a compimento, aggravando così la situazione. La democratizzazione della scuola fa esplodere ulteriormente il problema dell'inadeguatezza dell'edilizia scolastica e della carenza di aule spazi da dedicare all'istruzione. Si avverte così la necessità di compiere un radicale rinnovamento legislativo che abbia come criterio il completo trasferimento del potere decisionale in materia di programmazione e delle modalità di attuazione alle Regioni, e attraverso le Regioni alle Province e ai Comuni, lasciando a carico dello Stato l'onere di provvedere ai finanziamenti in misura adeguata all'entità dei fabbisogni.

Come appare già ben chiaro negli anni Settanta, a differenza delle altre funzioni, quella educativa richiede uno specifico spazio sia per l'applicazione dei moderni metodi pedagogici, sia per lo svolgimento della tradizionale attività didattica. Si tratta infatti di un luogo specifico, difficilmente organizzabile secondo improvvisate destinazioni d'emergenza, o con fabbricati non propriamente destinati all'edilizia scolastica, proprio perché atto a favorire lo svolgersi di un rapporto spaziale e temporale fra docenti e studenti.

La consapevolezza di una reale necessità di modificare il sistema scolastico in senso ampio, affinché essa possa assolvere veramente il suo compito sociale, si manifesta nei cittadini e nell'am-

ministrazione, contemporaneamente alla lotta per trasformare la città per renderla capace di rispondere realmente alle sue funzioni civili. Sulla base della concezione di scuola e città intese come enti emancipatori, liberatori e democratici, in questi anni, l'amministrazione comunale compie sforzi continui per realizzare "scuole moderne" e per trasformare una "città moderna", perseguendo l'instaurarsi di una rete di rapporti e momenti di collaborazione con tutti i settori della città, culturali, sociali, politici ed economici, più sensibili alle problematiche della scuola.

Durante questi anni, il tema della scuola acquista grande importanza, raggiungendo una sensibilizzazione a carattere nazionale. Nel 1960, a Milano, si tiene la **XXII Triennale** sul tema "La casa e la scuola". All'interno di questa, si tiene il *Congresso internazionale di Edilizia Scolastica*, vertente sui temi relativi agli spazi per la scuola e alla situazione dell'edilizia scolastica in Italia. Il Congresso si pone in continuità con tre precedenti analoghe manifestazioni sul tema dell'edilizia scolastica, svolte a Zurigo, a Rotterdam e a Parigi. Il congresso si conclude ribadendo le posizioni precedentemente stabilite in merito alla necessità di raggiungere una collaborazione interdisciplinare per formare quadri qualificati di progettisti che garantiscano un'edilizia scolastica idonea al livello delle più moderne esigenze pedagogiche, parallelamente a un aggiornamento della legislazione vigente.

Per rispondere alle forte carenza di aule scolastiche riscontrata nel territorio italiano, la **Legge 15 febbraio 1961, n. 53**¹ propone lo stanziamento di 1.400 milioni di lire per l'incremento dell'edilizia scolastica prefabbricata, decretando la nascita dell'edilizia scolastica prefabbricata. La legge non entra nel merito qualitativo delle tecniche innovative di prefabbricazione, ma interviene soltanto per rispondere in tempi brevi all'emergenza da affrontare. Con una parte di questa somma di denaro stanziata, viene innanzitutto concentrato l'intervento nel Comune di Napoli, dove la carenza di aule scolastiche necessita di un intervento piuttosto urgente, e con il restante viene bandito un appalto concorso per l'assegnazione dei fondi ai vari Comuni italiani. Purtroppo però, i terremoti avvenuti in Irpinia bloccano la gara e portano a dedicare i fondi alle zone maggiormente colpite. Dunque, l'appalto concorso si conclude nel dicembre del 1962, con un totale di 83 edifici prefabbricati realizzati in alcuni Comuni del Sud Italia².

Un anno dopo, esce la **Legge 26 gennaio 1962, n. 17**³, che si propone di aumentare la cifra

1 Art. 2 della Legge 15 febbraio 1961, n. 53: "(...) Il residuo ammontare di tali quote, pari ad un Miliardo e 800 milioni, è utilizzato, con l'entrata in Vigore della presente Legge, fino a 400 milioni, in due annualità, per il Potenziamento dei centri di lettura, semprechè Diretti da insegnanti di Ruolo, e per un miliardo e 400 milioni per L'incremento dell'edilizia scolastica prefabbricata."

2 D'Arconte L., Frateili E., Cicconcelli C., *La prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, in Ministero della Pubblica Istruzione (a c. di), "Quaderni del centro studi per l'edilizia scolastica", Le Monnier, Firenze 1965.

3 Art.3 della Legge 26 gennaio 1962, n. 17: "Al fine di provvedere alla deficienza di aule scolastiche, nei Comuni che sono obbligati a fornirle in base alla legislazione vigente, gli stanziamenti previsti dall'art.4 della L.53/1961, per incremento dell'edilizia scolastica prefabbricata, sotto forma di edifici e di elementi modulari, sono aumentati di L.20.000 milioni per la costruzione di scuole dell'obbligo nei Comuni predetti, che forniranno aree di loro proprietà idonee per le costruzioni stesse (...). Per gli studi di programmazione e di razionalizzazione relativi all'edilizia scola-

stanziata per la realizzazione di nuove aule scolastiche fino a 20 miliardi di lire, a rappresentanza del primo significativo sviluppo dell'edilizia scolastica. Viene quindi indetto un secondo appalto concorso, questa volta però distinto in due gradi: qualificazione dei sistemi di costruzione; aggiudicazione delle opere alle Imprese qualificate. Questa differenza sostanziale rispetto alle modalità della prima gara rispecchia il nuovo approccio alle problematiche legate all'edilizia scolastica, considerandone non soltanto gli aspetti quantitativi di intervento emergenziale, bensì anche quelli qualitativi inerenti ai materiali e alle tecniche impiegate. Infatti, l'art.3 della legge autorizza uno stanziamento destinato espressamente a "studi di programmazione e razionalizzazione relativi all'edilizia scolastica prefabbricata", segnando così l'inizio di una vera e propria ricerca sperimentale nel campo della prefabbricazione.

In realtà, la seconda fase della gara indetta non viene svolta, poiché per diminuire le tempistiche viene emanata la **Legge 26 gennaio 1963, n. 47** che autorizza le Amministrazioni a derogare dalle procedure previste, affidando le opere alle 22 Imprese⁴ risultate qualificate nella prima fase. Il risultato di questa seconda gara vede la realizzazione di 339 edifici in tutto il territorio italiano. La Direzione dei lavori viene affidata all'ISES (Istituto per lo Sviluppo dell'Edilizia Sociale) che, venendo a contatto con i diversi modi di approcciarsi al problema da parte delle varie imprese, ottiene una conoscenza molto ampia dei materiali utilizzati, delle tecniche e dei tempi di realizzazione. Questo fattore pone le basi per un'analisi piuttosto approfondita delle tecniche di prefabbricazione, che coinvolge diversi metodi proposti dalle imprese e rappresenta un panorama di possibilità da poter studiare e approfondire ulteriormente.

Sulla scia di questa duplice esperienza, due anni più tardi, viene promulgata la **Legge 18 dicembre 1964 n. 1358**⁵, che stanZIA una cifra di 2.400 milioni di lire per finanziare nuovamente la realizzazione di edifici scolastici. Come nei casi precedenti, viene indetto un appalto concorso il cui esito vede la realizzazione di 26 edifici scolastici da parte delle imprese aggiudicatrici. Queste esperienze risultano altamente significative, non soltanto in termini di analisi e studio della storia della prefabbricazione come tecnica costruttiva innovativa per l'epoca, ma anche come termine di

stica prefabbricata è autorizzata la spesa di 100 milioni a favore della Direzione Generale dell'Edilizia e dell'Arredamento scolastico, esistente presso il Ministero P.I."

4 Le Imprese qualificate sono: Bini, Bortolaso, Ceto Medio, Comansider, Coprefel, Edilplast, Elp, Feal, Grassetto, Greppi, Ipi, Ircor, Pasotti, Pollice, Saira, Salvit, Siano, Spred - Gaburri, Spred - Laingmet, Spred - Pizzarotti, Tecnosider, Vibrocemento. Di queste, soltanto Elp, Spred - Gaburri, Spred - Laingmet e Spred - Pizzarotti utilizzano il conglomerato cementizio armato come struttura portante: il motivo per cui soltanto quattro imprese utilizzano il cemento armato deve essere ricercato nel fatto che l'acciaio fornisce più garanzie, in quanto materiale da costruzione maggiormente utilizzato e dunque maggiormente conosciuto.

5 Art.1 della Legge 18 dicembre 1964, n. 1358: "Incremento di fondi per l'edilizia scolastica È autorizzato l'aumento dei limiti di impegno di cui alla legge 9 agosto 1954, n. 645, e successive modificazioni ed integrazioni, nella misura di lire 5 miliardi per il periodo 1 luglio - 31 dicembre 1964 e di lire 5 miliardi per l'esercizio finanziario 1965, per provvedere all'integrazione dei contributi relativi a opere di edilizia scolastica in corso di realizzazione e all'attuazione delle opere già programmate ma non ancora iniziate. Le eventuali somme residue potranno essere destinate ad opere rese indifferibili per ragioni di sicurezza o a seguito di calamità."

verifica delle caratteristiche della stessa, in relazione alle tipologie di edifici nei quali viene impiegata e alle problematiche conservative. L'aspetto innovativo che comportano questi primi approcci alla prefabbricazione edilizia consiste nell'avvio di un nuovo approccio alla progettazione, oltre che all'introduzione di un nuovo atteggiamento propositivo nella realizzazione di edifici pubblici, mai verificato prima, indotto dal rispetto dei brevi tempi concessi (in entrambe le gare).

Un altro evento molto importante avviene all'inizio degli anni Sessanta all'interno del dibattito sull'unificazione della scuola media: nel 1962 viene nominata una **Commissione Nazionale d'indagine sulla Scuola**, con la funzione di individuare le linee di sviluppo della pubblica istruzione, sia in rapporto alla popolazione in età scolastica, sia in rapporto ai fabbisogni della società italiana, in relazione allo sviluppo economico e al progresso sociale. La Commissione d'Indagine termina i suoi lavori e nel 1963 presenta la relazione finale al Ministro, basata sull'indagine campione, svolta in dieci località, coinvolgendo gli Enti locali e, spesso, anche le Università. La Commissione avanza una serie di proposte, fra cui la necessaria istituzione di un Centro Normativo per la tipizzazione e industrializzazione, a cui affida il compito di promuovere la creazione di processi produttivi in grado di combinare qualità ed economicità. Inoltre, agli Enti competenti viene assicurata la propria autonomia, viene abbandonato il sistema del pagamento in annualità, e lo Stato si assume il finanziamento totale o diretto delle opere. Nonostante i veti imposti, il lavoro della Commissione rimane sostanzialmente inascoltato, almeno durante quegli anni. Tale esperienza si colloca comunque in maniera significativa all'interno del radicale cambiamento di approccio al problema dell'edilizia scolastica, facendo emergere la sua necessità di essere accolta in uno specifico spazio, per l'applicazione di quelli che diventano i moderni metodi pedagogici.

Successivamente, viene promulgata la **Legge 28 luglio 1967, n. 641**, simile nelle intenzioni a quelle degli anni precedenti, e quindi avente l'obiettivo di finanziare la realizzazione di aule scolastiche per le scuole dell'obbligo. Alla luce della carenza di aule destinate alla scuola e della scarsa qualità degli edifici, questa legge si introduce nell'ottica di incrementare l'offerta di ambienti scolastici per la scuola obbligatoria. Sulla base del lavoro svolto dalla Commissione d'Indagine, viene in seguito elaborato un piano pluriennale di finanziamenti⁶ (con scadenza nel 1971), sotto forma di

⁶ Legge 28 luglio 1967, n. 641 - *Nuove norme per l'edilizia scolastica e universitaria e piano finanziario dello intervento per il quinquennio 1967-1971*: "Programmi per l'edilizia delle scuole elementari secondarie e artistiche. La costruzione, l'ampliamento, il completamento e il riattamento di edifici, compresi le palestre e gli impianti sportivi, destinati alle scuole statali elementari, secondarie ed artistiche, nonché agli istituti statali di educazione, sono eseguiti in base a programmi quinquennali. Nella formulazione dei programmi si ha riguardo alle risultanze del censimento di cui all'articolo 10 della L. 13 luglio 1965, n. 874, e alla L. 26 aprile 1966, n. 260, per eliminare le carenze e gli squilibri esistenti; agli aggiornamenti annuali e ai programmi di nuove istituzioni di scuole e di riassetto territoriale di quelle già esistenti, stabiliti dal Ministro per la pubblica istruzione in relazione anche alle esigenze del programma nazionale di sviluppo economico, per assicurare gli interventi richiesti dallo sviluppo equilibrato della scuola. Per il quinquennio 1967-1971 l'esecuzione delle opere di edilizia scolastica di cui al primo comma del presente articolo, avviene a totale carico dello Stato e sotto il controllo e a cura del medesimo, con l'osservanza e nei limiti delle disposizioni della presente legge. (...) Per l'esecuzione delle opere edilizie, ai sensi dell'articolo 1 della presente legge, sono autorizzate le spese di lire 180 miliardi; lire 200 miliardi; lire 235 miliardi; lire 235 miliardi e lire 150 miliardi, rispettivamente per

“Linee direttive del piano di sviluppo pluriennale della scuola per il periodo successivo al 30 giugno 1965” che coprono il periodo compreso tra il 1965 e 1970. Nonostante i finanziamenti proposti da queste leggi non siano considerati idonei per rispondere in maniera adeguata alla richiesta di spazi per la scuola, l’esito viene comunque considerato positivo, soprattutto nell’ottica di attesa di un secondo piano di finanziamenti che, però, non è mai stato realizzato. In realtà, probabilmente, l’attesa di una ulteriore modifica della Legge n. 641 non avrebbe risolto comunque il problema, in un paese come l’Italia in cui soltanto i Comuni possono avere una consapevole conoscenza del territorio, tale da indirizzare in modo esaustivo e corretto le scelte progettuali, spaziali, e di localizzazione per i servizi pubblici.

La **Legge 5 agosto 1975, n. 412** può essere considerata l’ultima legge che prevede un piano per l’aumento dell’edilizia scolastica. Gli interventi per la costruzione e l’ampliamento previsti da tale legge sono attuati mediante due programmi triennali, nel quadro della programmazione scolastica nazionale, riferiti rispettivamente agli anni 1975-1977 e 1978-1980. Anche questa legge si prefigge l’obiettivo non soltanto di aumentare il numero di aule scolastiche per rispondere a esigenze in termini quantitativi, ma anche quello di mirare a una crescita qualitativa, attraverso la sperimentazione nel campo dell’edilizia prefabbricata⁷.

gli anni finanziari 1967, 1968, 1969, 1970 e 1971.”

⁷ Legge 5 agosto 1975, n. 412 - *Norme sull’edilizia scolastica e piano finanziario d’intervento*:

“Art 4. Principi fondamentali per l’esecuzione delle opere di edilizia scolastica - Le regioni, comprese quelle a statuto speciale, emanano norme legislative per l’affidamento e la esecuzione delle opere di edilizia scolastica; dovrà essere previsto che per l’esecuzione delle opere gli enti obbligati, province e comuni e consorzi costituiti tra tali enti, operino anche mediante l’istituto della concessione, secondo le disposizioni di cui all’articolo seguente, ove possibile con piani organici di opere, per incentivare i processi di industrializzazione edilizia.

Art 5. Disciplina della concessione - L’esecuzione delle opere finanziate con la presente legge può essere affidata in concessione, mediante apposita convenzione, a enti, a imprese od a consorzi di imprese, nonché a cooperative o loro consorzi. L’affidamento in concessione deve avvenire con provvedimento motivato sulla base di un confronto tecnico ed economico delle offerte a tal fine presentate a seguito di bando. Gli enti, le imprese o i consorzi di imprese, nonché le cooperative o loro consorzi che partecipano alla gara devono fornire la dimostrazione della loro capacità tecnica ed economica.

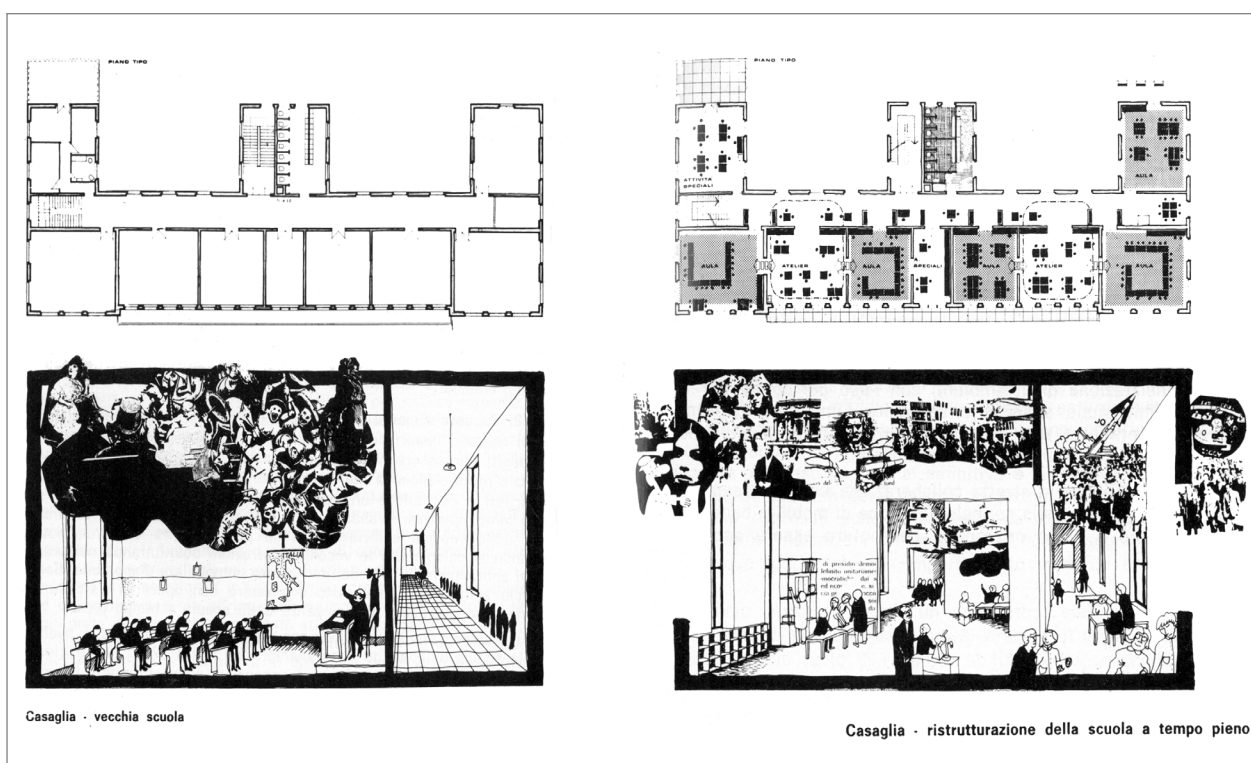
Art 6. Finanziamento dei programmi e snellimento delle procedure - Per la realizzazione dei programmi di cui al precedente articolo 2 è autorizzata la spesa di lire 800 miliardi per il periodo 1975-1977 e di lire 1.050 miliardi per il periodo 1978-1980.

Art 7. Edilizia sperimentale - Per i compiti di studio e di ricerca in materia di edilizia scolastica, di progettazione e di tipizzazione, anche al fine di costituire un patrimonio progetti e per avviare procedure d’appalto per modelli, con particolare riguardo alla edilizia industrializzata; per la realizzazione di opere di edilizia scolastica sperimentale da destinare, sentita la regione interessata, ad indifferibili esigenze edilizie, è autorizzata la spesa di lire 50 miliardi che sarà iscritta nello stato di previsione della spesa del Ministero della pubblica istruzione in ragione di 5 miliardi per l’anno 1976, di lire 10 miliardi per l’anno 1977, di lire 10 miliardi per l’anno 1978 di lire 10 miliardi per l’anno 1979, di lire 10 miliardi per l’anno 1980 e di lire 5 miliardi per l’anno 1981.”

IV.1.2 POLITICA DI INTERVENTO DEL COMUNE DI BOLOGNA

In questo contesto, l'obiettivo del Comune durante questi anni consiste nel perseguimento di una scuola capace di costituire un centro di vita comunitario di una intera zona urbana, pertanto inserita all'interno di una organizzazione urbanistica razionale. Si tende dunque a una scuola articolata secondo una tipologia funzionale mediante "strutture edilizie di tipo nuovo", adeguate al tempo pieno e alla vita di comunità, dotate di spazi aperti e flessibili, aperte alla creatività degli organismi che la gestiscono e delle diverse comunità scolastiche, attrezzate con impianti sportivi, laboratori e comunicazione.

In particolar modo, durante questi anni, si vuole rifuggire dall'impiego delle tradizionali "aule mono-scatole" dello schema aula-corridoio e dei refettori massificanti, per muoversi verso la configurazione di un edificio scolastico di più ampio respiro, che consenta di abolire il fenomeno dei doppi turni [Fig. 1]. Quanto sopra elencato costituisce l'insieme dei nuovi criteri alla base delle nuove scuole bolognesi, studiati e delineati in funzione della trasformazione delle istituzioni.



[Fig. 1] Rappresentazione fumettistica dello spirito di innovazione e creazione di una "scuola moderna", capace di costituire un centro di vita comunitario. I nuovi ambienti progettati sono volti alla realizzazione di strutture edilizie adeguate al tempo pieno e alla vita di comunità, dotate di spazi aperti e flessibili, di laboratori e di spazi di comunicazione, prive quindi delle tradizionali "aule mono-scatole" e dello schema aula-corridoio.

Queste considerazioni non si rivolgono però soltanto agli edifici di nuova costruzione, bensì anche alle scuole esistenti, il cui impianto deve uniformarsi ai medesimi principi, provvedendo a una ristrutturazione coerente degli spazi educativi alloggiati all'interno di strutture non più idonee. Tale discorso deve essere applicato non soltanto agli edifici scolastici esistenti, realizzati in tempi in cui i criteri di progettazione erano ispirati all'imposizione autoritaria dell'insegnamento e alla segregazione dall'ambiente circostante, bensì anche ai grandi fabbricati che sono stati trasformati in scuole, quali grandi palazzi, ampi conventi, o altri complessi.

L'esperienza positiva della città di Bologna, degna di nota a livello europeo ed extraeuropeo, dimostra come, proprio attraverso il recupero di edifici esistenti, sia possibile ottenere una più sostanziale varietà progettuale per gli ambienti educativi. Riferendosi a questi anni, si può parlare di "recupero attivo" per la scuola e per la città, che costituiscono un binomio sempre più inscindibile nell'ottica di una partecipazione democratica, intesa come sinonimo di efficacia ed efficienza.

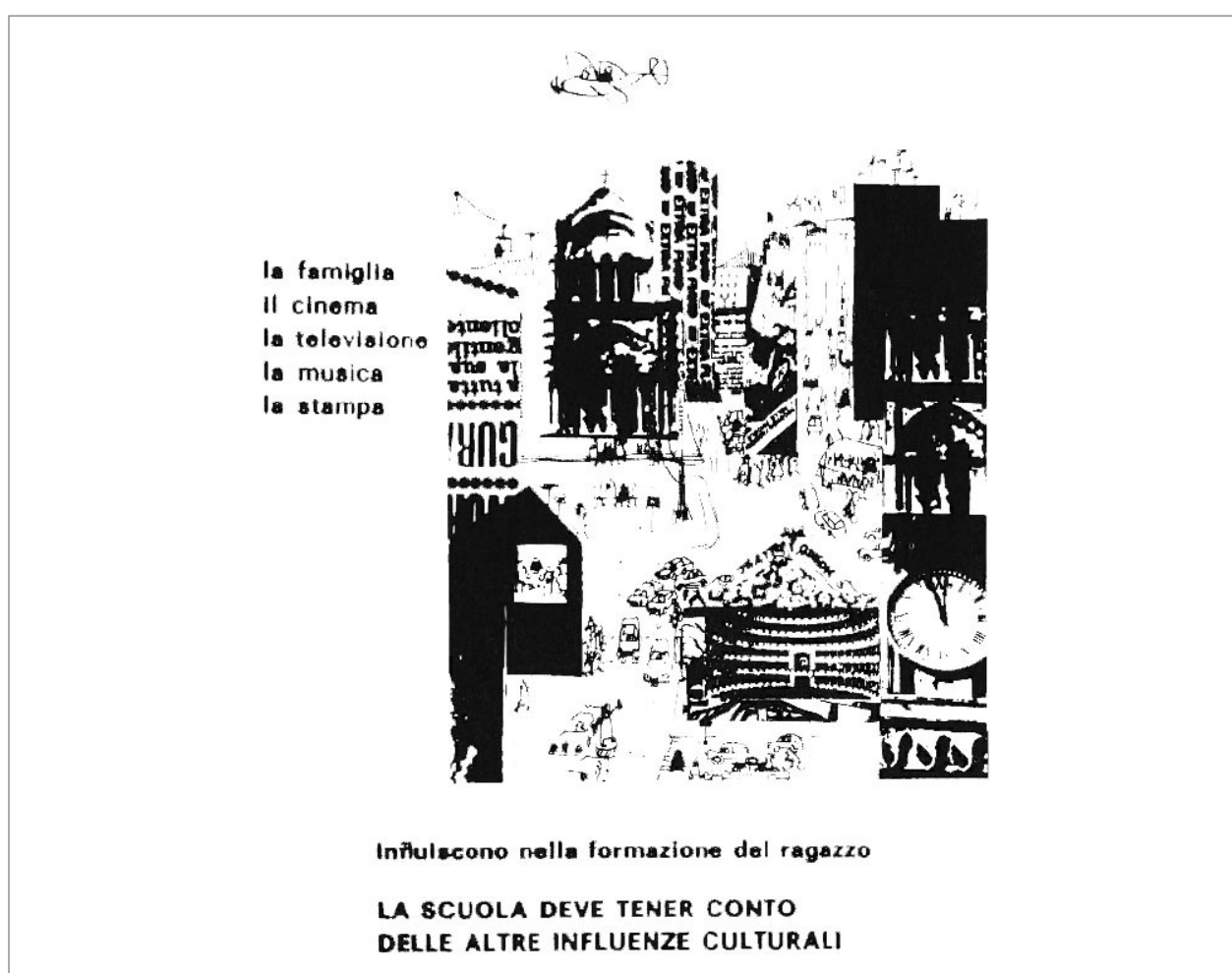
La progettazione di strutture scolastiche nel Comune di Bologna durante gli anni Settanta rappresenta infatti un processo continuo di partecipazione e ricerca, in cui si realizza un confronto immediato con la realtà per cui si opera. A questo processo intervengono direttamente insegnanti, consigli di quartiere o di frazione, operatori specializzati nei vari settori di competenza, quali urbanisti, medici, pedagogisti, oltre a tecnici progettisti. Questa forma partecipata di produzione dei servizi si pone come premessa per il rinnovamento qualitativo e l'incremento quantitativo dei medesimi.

Un avvenimento importante per il Comune di Bologna riguarda la delibera adottata dal Consiglio Comunale che, nel marzo 1963, istituisce i Quartieri come organi di decentramento democratico. Si tratta di centri di partecipazione, di elaborazione e di decisione, dunque di luoghi di incontro nei quali il cittadino può trovare occasioni e condizioni per dare vita a nuovi rapporti e inquadrare la propria attività in una diversa dimensione sociale, più articolata e più ricca di contenuti democratici. Fin dall'inizio, il settore scolastico costituisce uno dei punti su cui maggiormente si concentra l'interesse dei quartieri e dei singoli cittadini, per l'ampiezza e la complessità dei problemi che lo riguardano.

In questo senso, l'amministrazione comunale si impegna notevolmente durante questi anni, non soltanto investendo in modo rapido ed efficiente il poco denaro concesso dallo Stato, bensì anche integrando con i propri finanziamenti e soprattutto con una accurata politica territoriale, volta alla dotazione di servizi sociali, scolastici e comunitari indispensabili per i nuovi insediamenti residenziali e per l'intera città. I quasi 3.000 ettari destinati a servizi sociali dalla variante generale del PRG sono la premessa essenziale per tradurre nel concreto l'articolata struttura di servizi: scuole, parchi, centri sociali, centri sportivi, unità sanitarie.

Analizzando le cifre relative ai differenti gradi di scuola, settore per settore, si nota la consistenza del fenomeno scolastico, anche per il caso specifico della Scuola Media, oggetto di studio:

SCUOLE MEDIE NEL COMUNE DI BOLOGNA	
AULE ESISTENTI AL 1969	617
AULE APERTE ENTRO IL 1974	201 (corrispondenti a 4.915 posti, considerando circa 24 alunni/aula)
% POSTI NUOVI RISPETTO A QUELLI COSTRUITI PRIMA DEL 1969	36,2 %
AULE PROGETTATE	18 (corrispondenti a 450 posti, considerando circa 25 alunni/aula)



[Fig. 2] Manifesto della Mostra “La scuola nel comprensorio bolognese, prospettive di sviluppo e documenti” (marzo 1964), di esposizione dei dati e documenti dell’indagine condotta nel comprensorio durante l’anno 1962-63, nel quadro della ricerca promossa dall’Assessorato all’Urbanistica del Comune di Bologna, con la collaborazione dell’Assessorato alla P.I. del Comune. Durante la mostra si svolgono incontri e dibattiti con gli amministratori del comprensorio e della Regione, con gli insegnanti, con architetti e urbanisti, con studenti della Facoltà di Architettura di Firenze, Milano, Venezia.

Come testimoniano i dati riportati dal mensile *Il Comune di Bologna per la scuola*, pubblicato a fine marzo 1975, durante gli anni compresi dal 1970 al 1975 a Bologna vengono redatti 154 progetti di edifici scolastici, circa 30 ogni anno. A fine marzo 1975, 100 di questi sono già stati realizzati, e 13 si trovano in corso di completamento nel marzo 1975. Nonostante la popolazione di Bologna rimanga numericamente stazionaria durante il periodo di tempo considerato, di durata pari a un mandato legislativo quinquennale, il bilancio consuntivo dell'attività svolta nel settore dell'edilizia scolastica testimonia una grande evoluzione della città, intendendo con questo termine la sua "qualificazione sociale e culturale, e non la tradizionale espansione territoriale e demografica"⁸.

All'apertura dell'anno scolastico 1973-74, in seguito al mancato rifinanziamento della legge e alla situazione di gravità presente in alcuni quartieri di Bologna, si perviene alla decisione di predisporre una progettazione e una programmazione dell'edilizia scolastica a livello di comprensorio, facilitando l'esecuzione di opere in quei comuni del PIC bolognese carenti o privi di uffici tecnici adeguati, e al contempo anticipando per questo settore la ristrutturazione dell'ufficio tecnico.

L'impegno del Comune di Bologna a realizzare nel più breve tempo possibile strutture scolastiche qualitativamente avanzate, per rispondere all'elevato numero di posti-alunno, porta a proporre una nuova tipologia di edificio scolastico, finalizzata alla realizzazione di soluzioni aperte che consentano una più ricca possibilità di integrazione tra gli spazi interni e tra questi e l'esterno, saldando la scuola alla collettività cittadina attraverso il verde, lo spazio di gioco, il parco, le varie attrezzature civiche [Fig. 2].

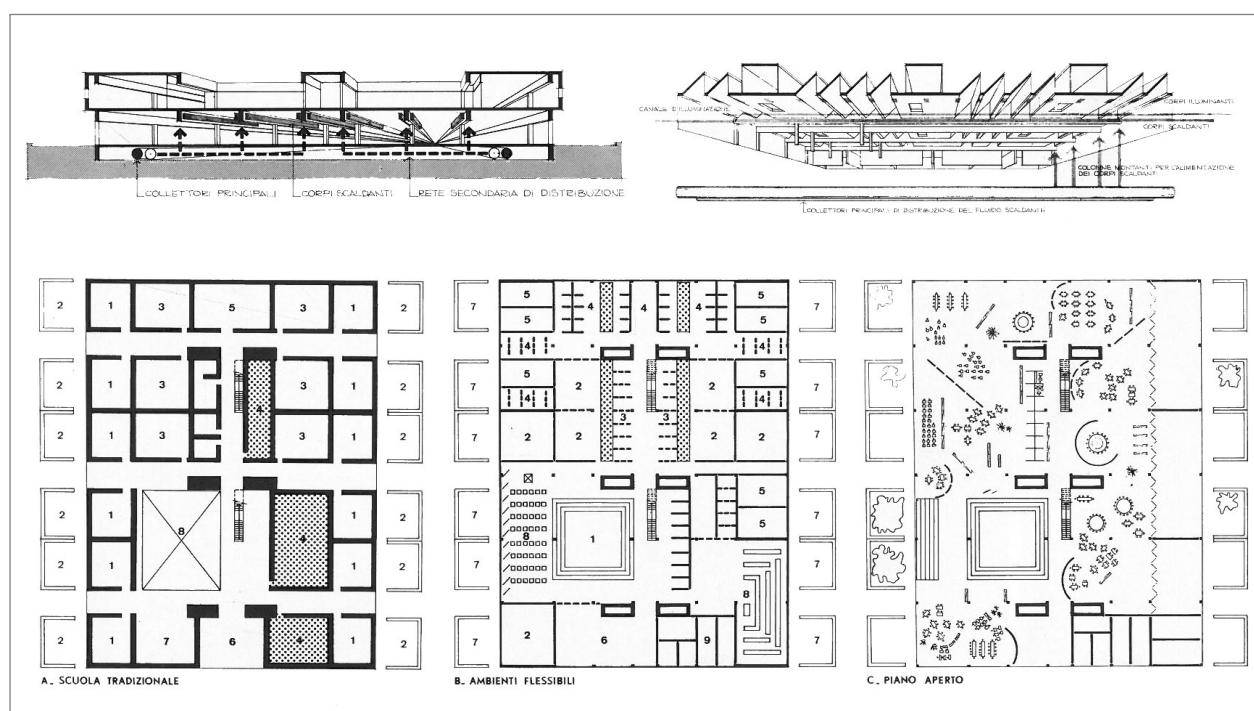
Con l'intento di svincolarsi dal limite che tradizionalmente lega la formazione dei gruppi di alunni all'unità didattica, si adottano piante compatte che arricchiscono le relazioni tra i diversi ambienti didattici ed eliminano gli spazi ciechi che ostacolano il fluido svolgimento delle attività. Si realizzano così strutture edilizie aperte, suddivisibili in un'ampia gamma di ambienti di varia grandezza, tuttavia concepiti come organismi unitari che danno allo studente la percezione della molteplicità delle relazioni in essi svolti [Fig. 3]. Gli ambienti interni sono definiti da pannelli che dividono i grandi vani in sotto-unità di lavoro e dall'arredo mobile che consente di creare nicchie per il singolo o per gruppi ristretti. Tra i vari criteri progettuali, figura inoltre la volontà di non scendere al di sotto di ben definiti minimi quantitativi e qualitativi per quanto riguarda gli standard legati alla superficie di 7,50 m² ad alunno, la dotazione di parchi scolastici, la progettazione di aule all'aperto protette da tende, di arredi, il materiale didattico, l'illuminazione naturale e artificiale.

⁸ "L'impegno dell'amministrazione comunale non si è esaurito nello spendere bene e presto il poco concesso dallo Stato, ma ha saputo integrare quel poco con propri finanziamenti e soprattutto con una accurata politica territoriale tesa alla dotazione di servizi sociali, scolastici e comunitari indispensabili per i nuovi insediamenti residenziali e per l'intera città. (...) I quasi 3000 ettari destinati alla variante generale al PRG a servizi sociali sono la premessa essenziale per tradurre nel concreto quell'articolata struttura di servizi: scuole, parchi, centri sociali, centri sportivi, unità sanitarie che se da una parte soddisfa esigenze attuali, dall'altra prefigura uno sviluppo equilibrato della città." (Cervellati P., Assessore dell'edilizia pubblica e privata, in Aa. Vv., *Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975.)

Alla qualificazione tipologica corrisponde l'adozione delle soluzioni tecnologiche moderne per l'epoca, mediante la trasposizione di elementi dal mondo industriale alla scuola. Tutti gli aspetti costruttivi dell'edificio vengono infatti caratterizzati in questo senso: le strutture portanti prefabbricate, i rivestimenti, i sistemi di comunicazione, gli arredi metallici, i pavimenti, gli infissi, la distribuzione degli impianti, i colori vengono selezionati in base a uno stretto controllo qualitativo ed economico.

Nel quadro dei metodi con i quali si imposta il lavoro di produzione di edifici scolastici nel quinquennio 1970-75, un elemento particolarmente significativo è rappresentato dall'organizzazione tecnico-amministrativa che, all'interno dell'apparato comunale, opera per la realizzazione dei programmi fissati dall'Amministrazione. La maggior parte dei progetti sono elaborati e realizzati dall'Ufficio Tecnico Comunale; alcuni di essi vengono commissionati a progettisti esterni, ma costruiti sotto la direzione dei tecnici comunali; soltanto per pochi si affida a progettisti esterni sia la progettazione, che la direzione lavori.

La mole dei lavori eseguiti e progettati durante questi anni comporta un progressivo adeguamento quantitativo della struttura esistente, contenendo comunque l'aumento del personale tecnico



[Fig. 2 bis] In alto: Sezioni illustrative della disposizione e del funzionamento degli impianti di riscaldamento e di illuminazione previsti per la progettazione sistematizzata degli edifici scolastici.

In basso: Schema illustrativo della trasformazione della tipologia distributiva, partendo dallo schema aula-corridoio della scuola tradizionale (A), alla configurazione di ambienti flessibili (B), fino alla progettazione di una scuola a piano aperto, caratterizzato da una elevata apertura e comunicazione tra gli ambienti (C).

addetto ai lavori (architetti, ingegneri, disegnatori, geometri, periti tecnologici, assistenti): dagli inizi del '70 agli inizi del '75 si rileva un incremento del 27% circa. Infatti, con una serie di oscillazioni dovute al rinnovo di una parte del personale, si passa da un corpo tecnico di 26 elementi a uno di 33, stimati nel 1973. Da questo conteggio è escluso il gruppo per l'edilizia scolastica del comprensorio, che viene considerato separatamente.

Più rilevanti dei dati quantitativi sono le modifiche qualitative dell'organizzazione interna dell'ufficio preposto all'edilizia scolastica e all'edilizia pubblica, le quali assumono un carattere innovativo rispetto ai modi tradizionali di operare di un ufficio pubblico e rappresentano una esperienza concreta anticipatrice di quella ristrutturazione generale dell'apparato tecnico e non tecnico del Comune.

Le innovazioni sostanziali nell'organizzazione interna dell'ufficio sono tre:

1. *Istituzione di Gruppi di Lavoro*: la suddivisione fra un reparto progetti (architetti e disegnatori), un reparto lavori (ingegneri, geometri, assistenti) e un reparto tecnologico specializzato in impianti viene abolita e sostituita da una ripartizione delle opere fra Gruppi di Lavoro, ciascuno dei quali raccoglie tutte le componenti tecniche che concorrono alla realizzazione dell'opera, dalla fase iniziale di definizione dei contenuti in collegamento con gli organi di quartiere, alle successive fasi di progetto esecutivo, appalto, direzione lavori, fino alla consegna dell'opera ultimata. In questo sistema, le diverse figure professionali vengono coinvolte sia nel momento programmatico e ideativo, sia nel momento realizzativo, dando un senso più compiuto al proprio lavoro, quale parte di un impegno collettivo alla realizzazione di servizi per la cittadinanza, stimolando la responsabilizzazione del singolo e favorendo i rapporti umani sul piano della collaborazione. Durante gli anni Settanta, i Gruppi di Lavoro risultano essere tre, ognuno composto dalle seguenti competenze tecniche: un architetto, un ingegnere, due disegnatori, quattro geometri, un perito tecnologico, due assistenti⁹. Inoltre, un ingegnere specializzato in impianti coordina l'attività dei periti assegnati ai tre gruppi di lavoro, assicurando una omogeneità di indirizzo nelle soluzioni impiantistiche e inserendosi nella progettazione architettonica con la propria competenza specialistica.

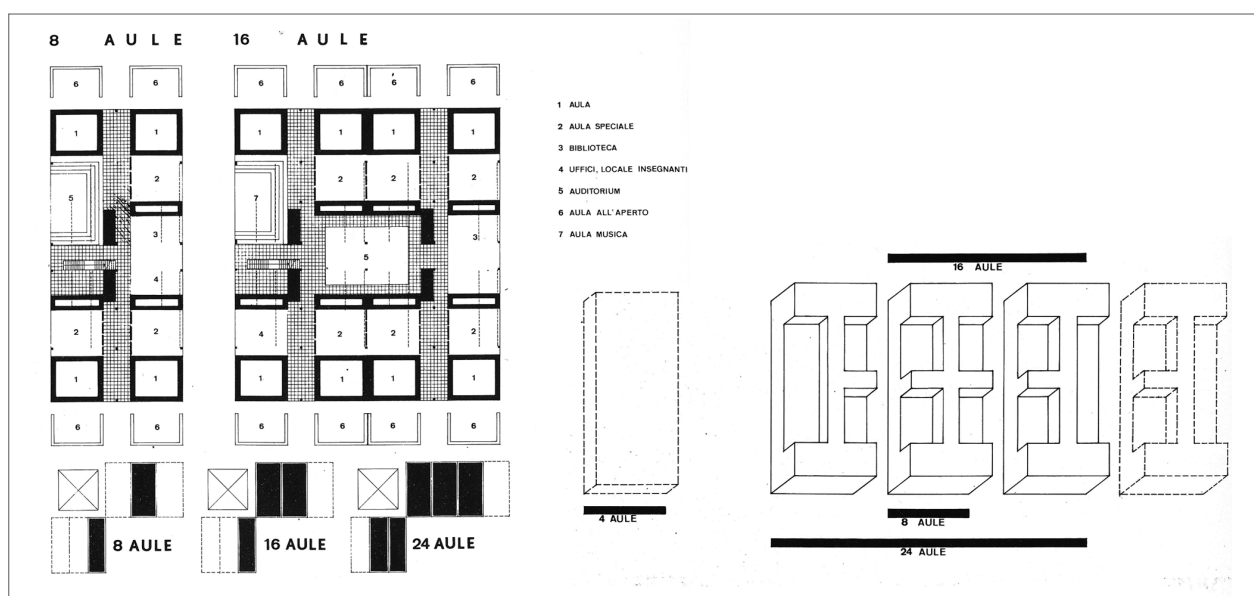
⁹ Per completezza, vengono specificate le figure coinvolte in questi anni nei gruppi di lavoro del Comune, poiché è soprattutto in questi anni che sono state realizzate le scuole analizzate in questa tesi, e, come si vedrà in seguito, i caratteri peculiari dei progetti saranno anche differenziati in base a tali figure professionali:

1° Gruppo di Lavoro: Arch. Fioretta Gualdi, Ing. Andrea Repetto, disegnatore Francesco Biavati, Geom. Franco Bettini, Geom. Aldo Cocchi, Geom. Sergio Filippucci, Geom. Giancarlo Mazzoli, Geom. Vittorio Rimondi, Per. Franco Benassi, assistenti Giancarlo Buzio e Giuseppe Tebaldi.

2° Gruppo di Lavoro: Arch. Riccardo Merlo, Ing. Alberto Paoli, disegnatori Gualtiero Pratizzoli e Serena Salvatorelli, Geom. Alberto Gallieri, Geom. Stefano Magagni, Geom. Romolo Masi, Geom. Lamberto Palizza, Per. Gianfranco Porcellini, assistenti Paolo Mioli e Mara Rivalta.

3° Gruppo di Lavoro: Arch. Carlo Salomoni, Ing. Zeno Puccetti, disegnatori Adriana Cavicchi e Sebastiano Masi, Geom. Sereno Blasi, Geom. Giovanni Govi, Geom. Gianfranco Manservigi, Geom. Carlo Marzari, Per. Luigi Rossi, assistenti Orlando Rosa e Francesco Cinti.

2. *Integrazione fra apparato tecnico e amministrativo*: questo provvedimento comporta l'apposito distaccamento di un funzionario amministrativo dagli uffici amministrativi centrali, assegnato a tempo pieno all'ufficio scuole, con il compito di curare tutte le incombenze amministrative del settore, in stretta collaborazione con il responsabile tecnico dell'ufficio. Questo provvedimento, unito all'aumento del personale esecutivo in rapporto all'aumento dei tecnici, consente un parziale snellimento delle procedure, ma soprattutto porta gli amministrativi a realizzare puntualmente i programmi.
3. *Inserimento di una attività al servizio dei Comuni del comprensorio intercomunale*: l'allargamento dell'attività dell'Ufficio Scuole dall'ambito comunale a quello comprensoriale si concretizza nel corso degli anni, dapprima in modo informale, fornendo ai Comuni che ne fanno richiesta progetti già elaborati dall'Ufficio e adattati alle specifiche esigenze delle situazioni locali, per poi essere istituzionalizzato. Infatti, nell'estate 1973, l'Assemblea del Piano Intercomunale costituisce in via sperimentale un quarto Gruppo di Lavoro, finanziato dai Comuni del comprensorio e distaccato presso la 1° Divisione dell'Ufficio Tecnico. Questo gruppo, formato da un ingegnere, un geometra e due disegnatori, svolge soltanto attività di progettazione in stretta collaborazione con i tre gruppi di lavoro del Comune di Bologna, avvalendosi inizialmente dei progetti tipo già disponibili, per poi contribuire successivamente all'elaborazione di nuovi, ma lasciando la parte esecutiva a cura dei singoli Comuni.



[Fig. 3] Schema distributivo preliminare al progetto globale per la realizzazione di quattro I.C. nel territorio Comunale di Bologna. Il blocco costituente la Scuola Media, identico per forma e distribuzione a quello affiancato della scuola elementare, è costituito dall'aggregazione di più unità elementari, ognuna delle quali comprende: otto aule, relativi servizi, aule all'aperto e spazi di didattici integrativi (a sinistra). Questa unità elementare può essere aggregata ad altre identiche, a costituire l'intero fabbricato (a destra).

Relativamente al territorio intercomunale, nel 1973 viene svolta un'indagine sull'edilizia scolastica anche per i Comuni esterni, attraverso schede di valutazione per ogni edificio. L'inchiesta mette in evidenza le forti carenze di aule in quasi tutto il territorio, oltre alla inadeguatezza degli edifici scolastici, rispetto ai nuovi parametri moderni. Le conclusioni a cui si giunge sono analoghe a quelle tratte in seguito al lavoro di indagine svolto una decina di anni prima per il Comune di Bologna, rilevando le medesime carenze e inadeguatezze. Il motivo, infatti, risiede ancora nella crescita smisurata avvenuta durante gli anni precedenti, senza controllo della popolazione, che ha portato a situazioni di disomogeneità e inorganicità.

Come ipotesi di soluzione a queste carenze, il Comune di Bologna propone la possibilità di Consorzi tra i Comuni in grado di gestire le costruzioni realizzate mediante l'impiego di un'edilizia industrializzata, riconoscendo valida un'unica impostazione progettuale a livello comprensoriale, al fine di garantire la qualità degli interventi.

I criteri maggiormente seguiti nella redazione dei progetti per le scuole di Bologna e provincia riguardano principalmente la dotazione di ampie aree scolastiche, di spazi destinati non soltanto all'apprendimento passivo, ma anche alle attività formative di gruppo. Questi criteri portano all'abolizione dello schema tradizionale aula-corridoio e alla realizzazione di scuole ad ampio respiro, con spazi aperti e arredi mobili, in modo da poter gestire gli spazi in modo personalizzabile. Come si osserva dalle schede redatte sulla base dei sopralluoghi di rilievo delle scuole di Bologna oggetto di Tesi, i modelli distributivi si modificano completamente, cambiando il tipo edilizio basandosi su tipologie costruttive totalmente nuove, impiegate per la realizzazione dei nuovi fabbricati a destinazione scolastica.

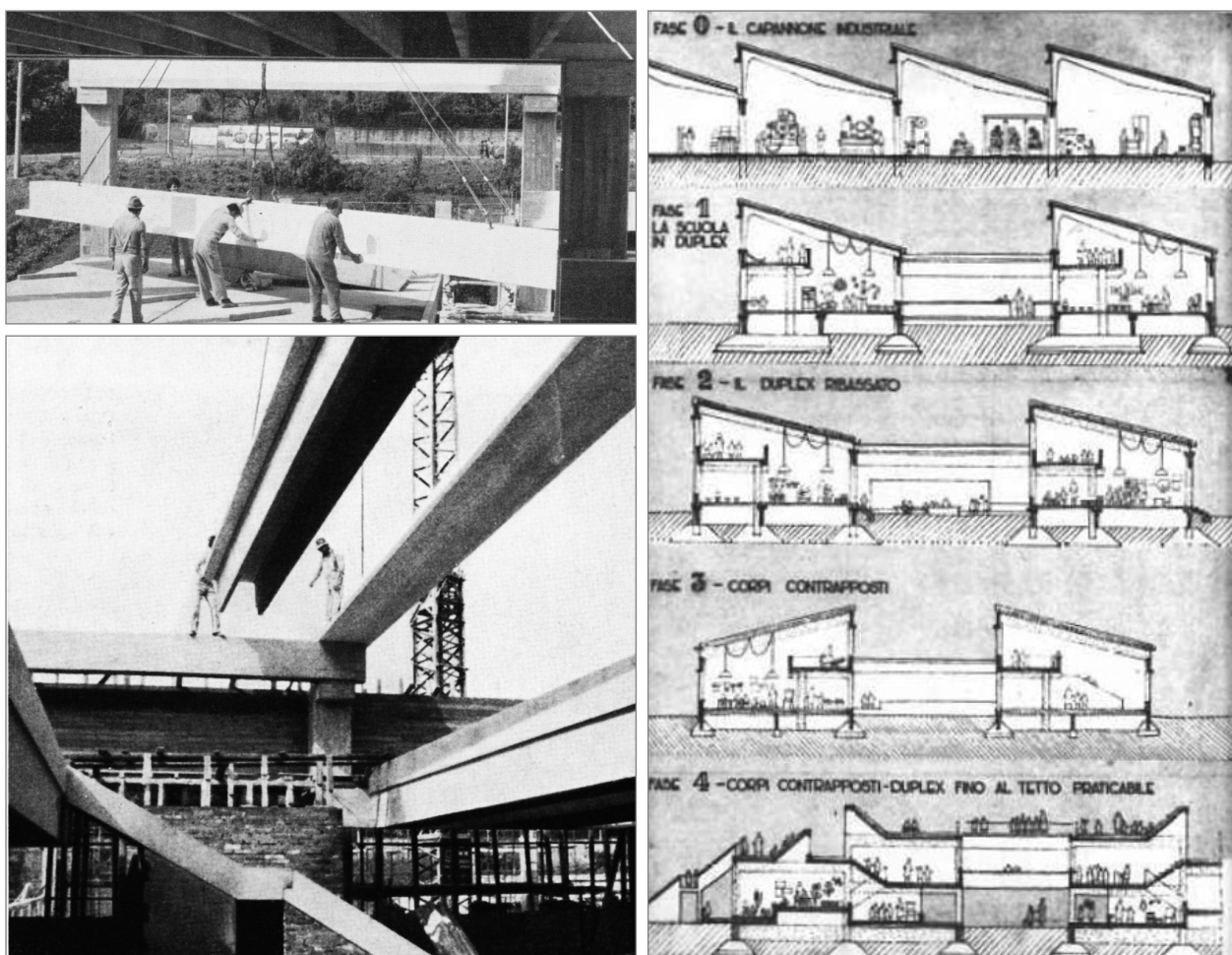
Per quanto riguarda i progetti di recupero degli edifici esistenti, essi hanno un carattere abbastanza generalizzabile, in quanto anche le scuole tradizionali sono molto simili tra loro, seguendo una tipologia standard basata sulla medesima distribuzione degli ambienti. Questi interventi nelle scuole esistenti consistono nel diradamento delle aule, nell'inserimento di ambienti comuni per le attività di gruppo, nell'allargamento delle porte di collegamento e divisione degli spazi, e nella destinazione di alcuni spazi per attività diverse dalla semplice lezione frontale, ad esempio laboratori e attività di gruppo.

Per quanto riguarda invece la realizzazione di nuove scuole, alla qualificazione tipologica sopra descritta corrisponde l'adozione delle più moderne soluzioni tecnologiche, mediante la trasposizione di elementi dal mondo industriale a quello dell'edilizia scolastica [Fig. 4]. Tutti gli aspetti costruttivi dell'edificio vengono caratterizzati in questo senso: le strutture portanti prefabbricate, gli arredi mobili, gli infissi, e qualsiasi altro elemento.

Gli edifici, infatti, devono essere costruiti in breve tempo, garantendo uno standard qualitativo finale elevato, ed essere quindi inquadrati in un piano di intervento che avesse il massimo dell'affidabilità e della credibilità. In questo senso, un processo di industrializzazione rivolto alla

costruzione di questi edifici presenta diversi vantaggi: il controllo degli standard e la semplificazione dell'intero processo di costruzione, con la conseguente diminuzione del tempo di realizzazione e dell'investimento economico. In alcuni casi, il progetto scolastico si basa sulla rivisitazione della tipologia degli edifici industriali, adattata all'ambiente della scuola, per realizzare aule ampie concepite con la stessa modalità dei capannoni industriali [Fig. 5].

Per la progettazione delle nuove scuole, viene posta particolare attenzione ad alcuni fattori di comfort interno, seppur secondo considerazioni riferiti agli standard energetici e ambientali di quegli anni (oggi non più validi), come ad esempio l'illuminazione, preferibilmente naturale (mediante le grandi superfici vetrate), la protezione dai rumori (sfruttando posizioni non troppo centrali, o comunque immerse nel verde) e il ricambio dell'aria (attraverso impianti per la presa di aria esterna).



[Fig. 4] A sinistra: Posa in opera degli elementi prefabbricati durante il cantiere di costruzione dell'Istituto Comprensivo "Dozza" (Quartiere Reno): posizionamento delle travi (in alto) e dei tegoli costituenti il solaio (in basso).

[Fig. 5] A destra: Schizzi illustrativi dell'analogia tra il procedimento costruttivo di un capannone industriale e quello di una scuola concepita secondo il nuovo modello scolastico e le tecnologie edilizie moderne.

Inoltre occorre rilevare che, a causa della necessità di realizzare un elevato numero di scuole in poco tempo, l'Ufficio Tecnico del Comune si avvale di progetti tipo, più volte replicati e adattati di volta in volta al particolare contesto di ubicazione dell'edificio, mantenendo comunque le stesse caratteristiche. Come si vedrà nel paragrafo successivo, i risultati sono spesso molto simili, se non addirittura identici; in molti casi, anche le strutture portanti sono le stesse, soprattutto se realizzate dalla stessa impresa (o Consorzio) vincitrice dell'appalto concorso.

Durante il quinquennio che va dal 1970 al 1975, a partire dai 154 progetti redatti dall'Ufficio Tecnico del Comune, vengono realizzati 100 edifici scolastici, con il conseguente notevole incremento di disponibilità dei posti. La popolazione in età scolare, rimasta invariata nell'arco dei cinque anni, e anzi diminuita lievemente nel caso di Asili Nido e Scuole Elementari, consente di affermare un rilevante miglioramento delle strutture scolastiche.

Nei cinque anni successivi, ovvero nel quinquennio che va dal 1975 al 1980, vengono realizzati altri 51 progetti di edifici scolastici nel Comune di Bologna, per la maggior parte destinati a Scuola Media, portando così alla disposizione di un totale di 105 aule per tale ordine scolastico, contro le 60 classi Elementari.

Nel decennio considerato si esaurisce gran parte dell'esigenza di edilizia scolastica, di ogni ordine e grado. Il completamento di tale programma avviene negli anni successivi con la realizzazione di altri complessi scolastici, ma si può considerare gran parte del lavoro legato all'incremento di aule scolastiche concluso negli anni Ottanta.

L'esperienza proposta dal Comune di Bologna nel campo dell'edilizia scolastica è interessante sotto vari aspetti. Innanzitutto essa dimostra che, laddove vi siano le capacità e le competenze, legate da uno spirito di collaborazione, l'autonomia regionale può superare, tanto in qualità quanto in quantità, la lenta burocrazia dello Stato. In secondo luogo, come si è detto, l'esperienza bolognese riporta gli esiti di una attenta analisi tipologica per la definizione di nuovi modelli in relazione alle necessità del territorio. Sotto il profilo storico-sociale e tecnico-costruttivo, anche se oggi sembrano decisamente superate e poco idonee allo svolgimento delle attività scolastiche, gli edifici realizzati presentano caratteristiche degne di nota, in quanto testimonianza delle tecnologie moderne nel campo dell'architettura di quell'epoca.

IV.1.3 CLASSIFICAZIONE DELLE SCUOLE SECONDARIE DI PRIMO GRADO BOLOGNESI

ANALISI DELLE TIPOLOGIE DISTRIBUTIVE

Gli edifici scolastici studiati presentano tipologie morfologiche e distributive che si ripetono nel patrimonio edilizio esistente, definendone la tipologia edilizia e il modello distributivo spaziale interno ed esterno. La lettura degli edifici scolastici in un'ottica morfologica e distributiva è volta all'analisi energetica degli stessi, in quanto il rapporto tra volume e superficie influisce in modo sostanziale sulle dispersioni termiche e dunque sul comportamento energetico.

Si chiarisce comunque che le categorie individuate di seguito non possono essere considerate esaustive di tutte le tipologie di scuole presenti sul territorio nazionale, poiché le numerose sperimentazioni effettuate durante il secondo dopoguerra hanno portato a molteplici soluzioni architettoniche.

In generale, all'interno del panorama edilizio scolastico, si possono individuare in prima istanza due **modelli distributivi** principali, legati relativamente a due modi distinti di interpretare l'insegnamento pedagogico:

- *schema a corridoio (o in linea)*: presenta i requisiti tipici del modello tradizionale di scuola dei primi del Novecento, caratterizzata da spazi separati tra loro, accessibili esclusivamente da un corridoio, unico elemento di collegamento lineare, posto al centro del piano tipo (*schema a corridoio centrale*) oppure lungo un lato (*schema a corridoio laterale*). Secondo la concezione di scuola, ormai superata, viene attribuita grande importanza agli spazi per l'insegnamento frontale, senza prevedere gli ampi luoghi comuni per lo svolgimento di quelle attività di gruppo, ricreative e formative, che col tempo acquisiranno sempre maggiore importanza;
- *schema a unità funzionali (o a grappolo)*: risponde in maniera adeguata alle esigenze manifestate dalla nuova concezione di scuola moderna, per la quale risulta fondamentale ai fini dell'apprendimento la possibilità di usufruire di ampi spazi comuni e aperti e di aule flessibili, che possano comunicare tra loro a seconda del programma didattico.

Un altro tipo di classificazione concerne la differenziazione di **tipi edilizi**:

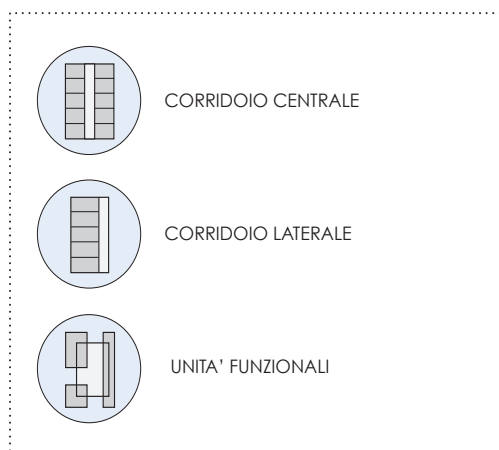
- *scuola a blocco*: tipo di scuola che nasce dallo sviluppo dello schema a corridoio, mettendo a sistema più aule contingue mediante collegamenti lineari delle dimensioni strettamente necessarie alla comunicazione tra le aule stesse. Generalmente, i servizi sono posti alle estremità del blocco.

Dall'accorpamento e dall'evoluzione di questo tipo morfologico derivano altri tipi, definibili come la *scuola a blocco accorpato* (generalmente disposti a L) e la *scuola a blocco con corte*;

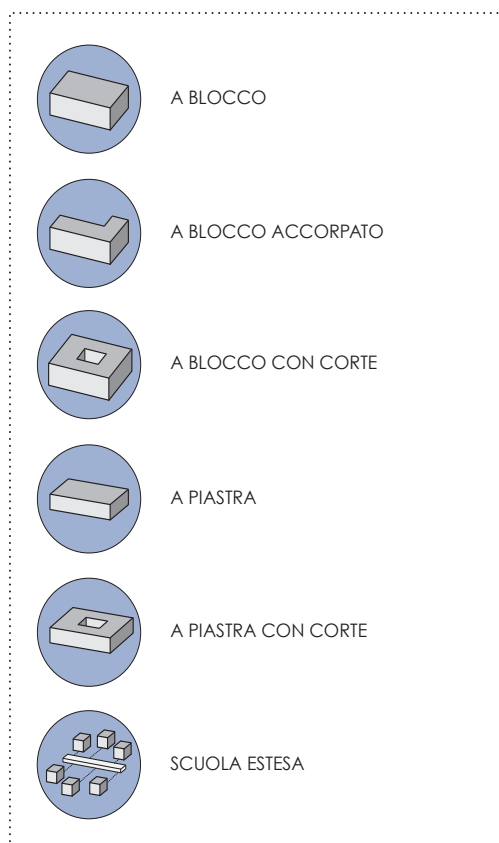
- *scuola a piastra*: tipo di scuola che raccoglie al suo interno la totalità delle funzioni legate alle attività didattiche della scuola, che nel tipo a blocco sono confinate all'esterno dell'edificio principale, all'interno di padiglioni o blocchi separati, e uniti al corpo principale tramite collegamenti coperti. Questo tipo di scuola coniuga il tipo di impianto volumetrico della scuola a blocco con l'estensione planimetrica della struttura caratteristica del tipo di scuola estesa. L'impianto distributivo di questo tipo di scuola può essere del tipo aula-corridoio, caratterizzato da collegamenti interni che raggiungono tutti gli spazi della scuola, così come del tipo a unità funzionali, all'interno del quale i collegamenti diventano lo spazio di articolazione fondamentale per la fruizione dell'edificio. Generalmente le scuole a piastra si sviluppano su uno o due piani, articolati secondo volumi che prevedono differenze di quota e creazione di superfici finestrate in copertura, per favorire l'illuminazione naturale degli ambienti dall'alto. Un'evoluzione del tipo a piastra consiste nella *scuola a piastra con corte*, ossia dotata di una corte interna che contribuiscono a migliorare l'illuminazione naturale degli ambienti interni;
- *scuola estesa*: tipo di scuola che, a differenza del tipo a blocco, tende a dilatare gli spazi verso l'ambiente esterno, integrando profondamente la sua estensione planimetrica con la natura circostante. Questo tipo di scuola è correlato al modello distributivo a unità funzionali, attraverso il quale è possibile differenziare notevolmente gli spazi della scuola;
- *scuola open plan*: tipo di scuola che, essendo caratterizzato dall'assenza di spazi di collegamento, sostituiti da pareti mobili e flessibili per la differenziazione degli ambienti interni, si colloca in una posizione ibrida tra la distribuzione aula-corridoio tipica dello schema a blocco e lo schema a unità funzionali;
- *scuola-strada*: tipo di scuola caratterizzato dalla distribuzione interna molto articolata, che porta a una configurazione frammentaria e disomogenea dell'edificio scolastico.

Al fine di rendere più facile e immediata la lettura della classificazione del patrimonio scolastico, sono stati decodificati dei simboli per indicare i modelli distributivi e i tipi edilizi ricorrenti nelle scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) diffuse nel territorio comunale di Bologna. Pertanto, all'interno delle schede tecniche, viene utilizzata la seguente simbologia¹⁰:

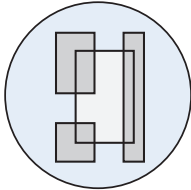
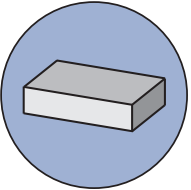
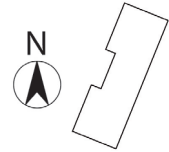
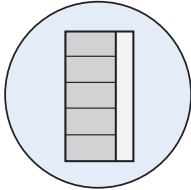
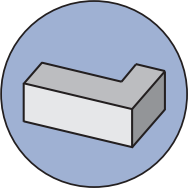
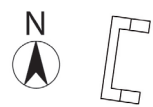
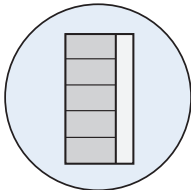
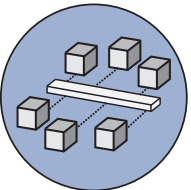
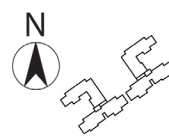
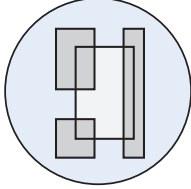
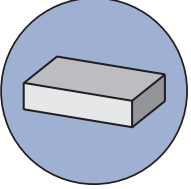
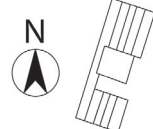
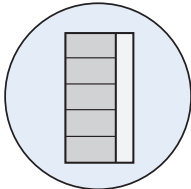
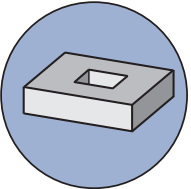

MODELLI DISTRIBUTIVI

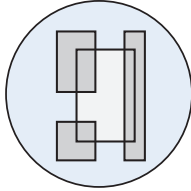
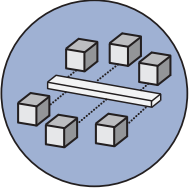

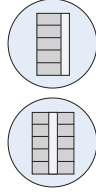
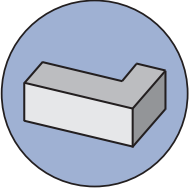
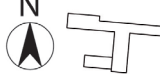
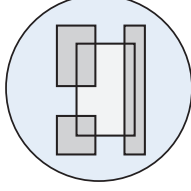
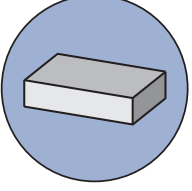

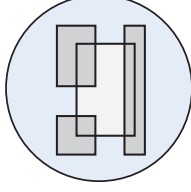
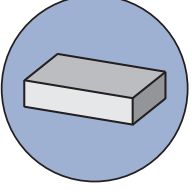
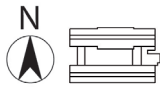
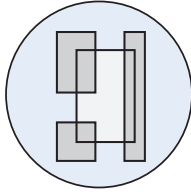
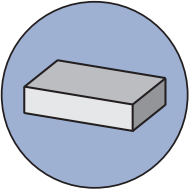
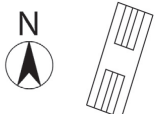
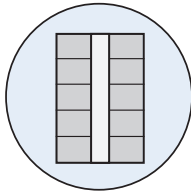
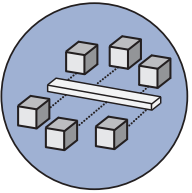





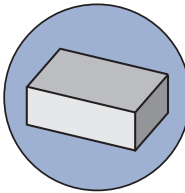


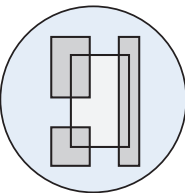
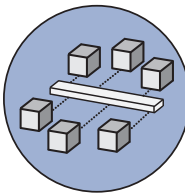


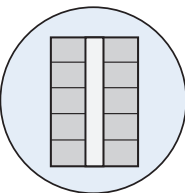
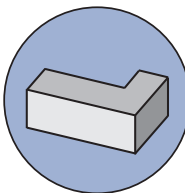

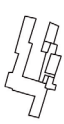
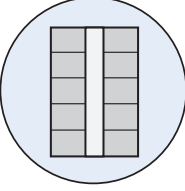
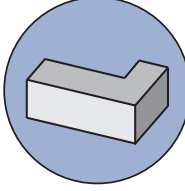


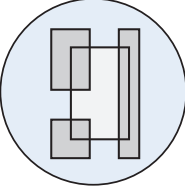
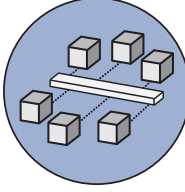

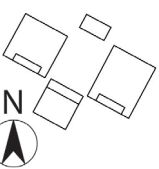
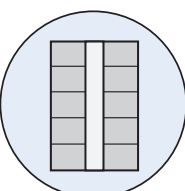
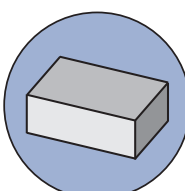


TIPi EDILIZI

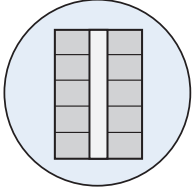
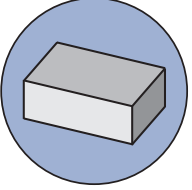
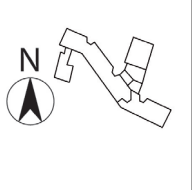
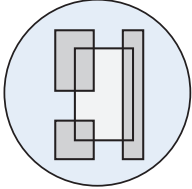
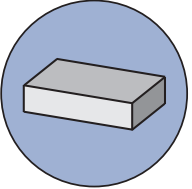
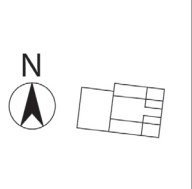
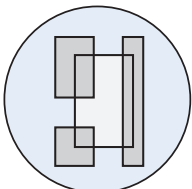
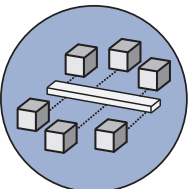
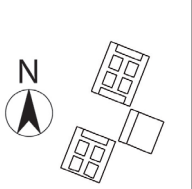
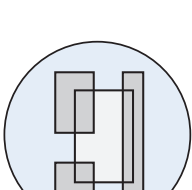
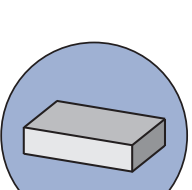
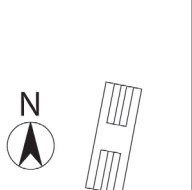
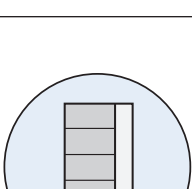
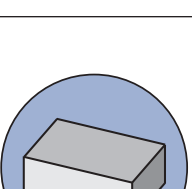
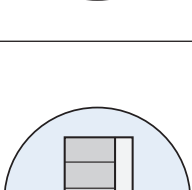
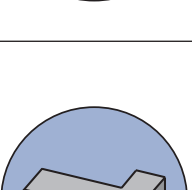


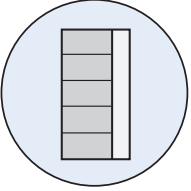
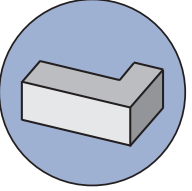
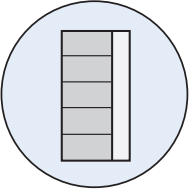
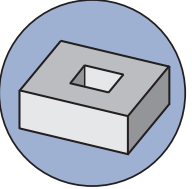
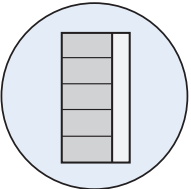
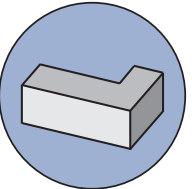
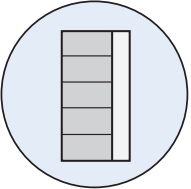
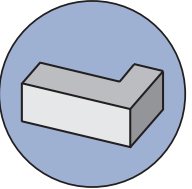
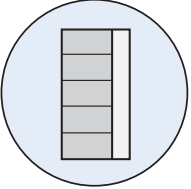
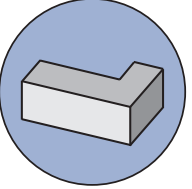
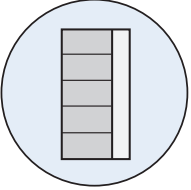
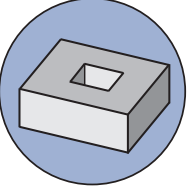
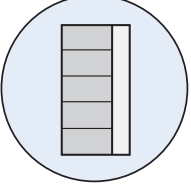
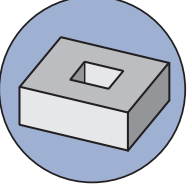
¹⁰ Si riportano esclusivamente i simboli dei modelli distributivi e dei tipi edilizi riscontrati nel patrimonio edilizio scolastico bolognese. La simbologia utilizzata si ispira parzialmente al metodo rappresentativo adottato nel testo: Boarin P., *Edilizia scolastica. Riqualificazione energetica e ambientale. Metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2010.

N.	QUARTIERE (BO)	NOME SCUOLA SECONDARIA DI I GRADO	INDIRIZZO	ANNO COSTRUZIONE	MODELLO DISTRIBUTIVO	TIPO EDILIZIO	ORIENTAMENTO	TIPOLOGIA STRUTTURALE	PROGETTISTI (SE PERVENUTA)	IMPRESA (SE PERVENUTA)	PREFABBRICAZIONE (SÌ/NO)	FINANZIAMENTO (SE PERVENUTO)
1	Borgo Panigale	“Volta” (I.C. n.14) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via D. Biancolelli, 38/40	1976-1978				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Ing. Finzi, Geom. Masi, Geom. Gallieri, Geom. Rivalta, Ing. Bottino)	EDILTER	SÌ	Finanziamento a totale carico del Comune, mediante Legge 5 agosto 1975, n.412 (programma straordinario di finanziamento del Comune)
2	Navile	“Testoni-Fioravanti” (I.C. n.5) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via A. Di Vincenzo, 55	1931				Muratura portante	NP	NP	NO	NP
3	Navile	“Panzini” (I.C. n.4) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via G. Verne, 19	1975				Mista, con telaio in c.a., pareti portanti e tamponamenti in muratura	Gruppo Arch. Salomoni	NP	MISTA	Finanziamento con piano di intervento straordinario a carico del Comune
4	Navile	“Zappa” (I.C. n.15) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via di Saliceto, 74	1978-1981				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Ing. Repetto, Geom. Masi, Ing. Bottino)	Fratelli Faggioli, Tecnosacca Prefabbricati S.p.A.	SÌ	Finanziamento a totale carico del Comune, mediante Legge 5 agosto 1975, n.412
5	Porto	“Salvo D’Acquisto” (I.C. n.3) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via della Beverara, 188	1985				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Merlo, Geom. Masi, Geom. Rauli)	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), EPC Emiliana Prefabbricati Coop (Campogalliano)	SÌ	NP

6	Porto	“De Andrè - Ex Alighieri” (I.C. n.18) Scuola Statale comprendente: scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Asiago, 33	1970-1972				Telaio in c.a. in opera	Arch. Fagnoni, Arch. Felli, Arch. Guarnacci	Fratelli Faggioli	NO	Finanziamento mediante Legge del 1967, n.641
7	Porto	“Gandino” (I.C. n.17) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Graziano, 8	1955-1958				Telaio in c.a. in opera	Arch. Vaccaro	Gambarino Sciaccalunga	NO	NP
8	Reno	“Giuseppe Dozza” (I.C. n.1) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via A. De Carolis, 23	1976-1978				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Ing. Finzi, Geom. Magagni, Geom. Gallieri, Ing. Bottino)	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), EDILTER	SÌ	Finanziamento a totale carico del Comune, mediante Legge 5 agosto 1975, n.412
9	Reno	“Zanotti” (I.C. n.2) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via del Giacinto, 39	1979				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Geom. Rivalta, Geom. Masi, Ing. Bottino)	NP	SÌ	NP
10	San Donato	“Besta” (I.C. n.10) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	viale Aldo Moro, 31	1979-1980				Mista, con telaio in c.a. gettato in opera e solai in c.a. prefabbricati (eccetto solaio P1 in latero-cemento gettato in opera)	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Geom. Mignani, Geom. Rivalta, Ing. Bottino)	I.C.E.T., RDB Piacenza (per solai prefabbricati), Ing. Uberti (per elementi gettati in opera)	MISTA	NP
11	San Donato	“Saffi” (I.C. n.11) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via A. Panzini, 1	1971-1973				Mista, con muratura portante, pilastri in muratura, travi in c.a., solai prefabbricati	Arch. Bonomi	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì)	MISTA	Finanziamento mediante Legge del 1967, n.641

12	San Donato	“Guido Reni” (I.C. n.16) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	vicolo Bolognetti, 10	1850 ca	 		 	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
13	San Vitale	“Jacopo della Quercia” (I.C. n.7) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Scandellara, 54/3	1972-1973			 	Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Arch. Merlo)	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), RDB Piacenza	SÌ	Finanziamento mediante Legge del 1967, n.641
14	San Vitale	“Innerio” (I.C. n.6) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via A. Finelli, 2	1963-1967			 	Telaio in c.a. in opera	Arch. Rizzi	Antonio De Leo	NO	NP
15	Santo Stefano	“Rolandino de’ Passeggeri” (plesso della Scuola Statale secondaria di I grado “Rolandino de’ Passeggeri - Pepoli”)	via G. Pascoli, 5	1900 ca			 	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
16	Santo Stefano	“Pepoli” (plesso della Scuola Statale secondaria di I grado “Rolandino de’ Passeggeri - Pepoli”)	largo Cardinale Lercaro, 14	1971-1973			 	Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Arch. Merlo)	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), RDB Piacenza	SÌ	Finanziamento mediante Legge del 1967, n.641
17	Santo Stefano	“Leonardo da Vinci” (I.C. n.13) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Buon Pastore, 4	1977-1978			 	Telaio in c.a. in opera	NP	NP	NO	Fondi privati per lo svolgimento di interventi di ristrutturazione dei locali presso l’Is- tituto Buon Pastore, per conto del Comune di Bologna

18	Saragozza	“Guinizelli” (I.C. n.8) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Cà Selvatica, 11	Anni ‘70				Telaio in c.a. in opera	NP	NP	NO	NP
19	Saragozza	“Carracci” (I.C. n.8) Scuola Statale comprendente: scuole secondarie di I grado	via F. Battaglia, 18	1976-1978				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Geom. Gallieri, Ing. Bottino)	NP	SÌ	Finanziamento con piano di intervento straordinario a carico del Comune
20	Savena	“Farini” (I.C. n.12) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Populonia, 11	1971-1974				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Arch. Merlo)	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), RDB Piacenza	SÌ	Finanziamento mediante Legge del 1967, n.641
21	Savena	“Guercino” (I.C. n.9) Scuola Statale comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via L. Longo, 4	fine 1970				Telaio in c.a. prefabbricato	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Ing. Repetto, Geom. Gallieri, Geom. Mignani)	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), AMA	SÌ	NP
22	Navile	“Beata Vergine di San Luca” (Istituto Salesiano) Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via J. Della Quercia, 1	1900			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
23	Navile	“Istituto Maria Ausili- atrice” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta comprendente: scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via J. Della Quercia, 5	1900 (intervento ristrutt. oratorio maschile)			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP

24	Porto	“Santa Teresa del Bambin Gesù” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Montello, 42	1930 ca			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
25	Santo Stefano	“Cerreto” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via della Braina, 11	1930 ca			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
26	Santo Stefano	“Istituto Figlie del Sacro Cuore di Gesù” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Orfeo, 42	1935 ca			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
27	Santo Stefano	“Istituto San Giuseppe” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via A. Murri, 74	1930 ca			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
28	Saragozza	“Malpighi” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via R. Audinot, 43	1930 ca			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
29	Saragozza	“Sant’Alberto Magno - Suore Domenicane” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta scuole dell’infanzia, scuole primarie, scuole secondarie di I grado	via Palestro, 6	fine 1800			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP
30	Saragozza	“San Luigi” Scuola Paritaria legalmente riconosciuta comprendente: scuole secondarie di I e II grado	via M. D’Azeglio, 55	fine 1500			NP	Muratura portante	NP	NP	NO	NP

ANALISI DEI CARATTERI TIPOLOGICO-COSTRUTTIVI

Il progetto di ricerca si basa su una prima analisi delle 30 scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) del Comune di Bologna¹¹.

Di queste scuole, 21 sono pubbliche e 9 private, alloggiate all'interno di edifici antichi e, nella maggior parte dei casi, di carattere storico-architettonico e religioso, come istituti religiosi, oratori, conventi e monasteri.

Il 60% delle Scuole Medie è stato costruito in epoca moderna, ossia nel secondo dopoguerra, mentre il 40%, che ospita principalmente scuole paritarie private, risale all'epoca antica che dalla metà dell'Ottocento arriva fino alla seconda metà del Novecento. In particolare, tra le 21 scuole pubbliche statali, soltanto 3 sono collocate all'interno di edifici antichi, riadattati alla nuova funzione scolastica (complessi comprendenti scuola dell'infanzia, primaria e secondaria di primo grado), contro le 18 scuole realizzate in epoca moderna.

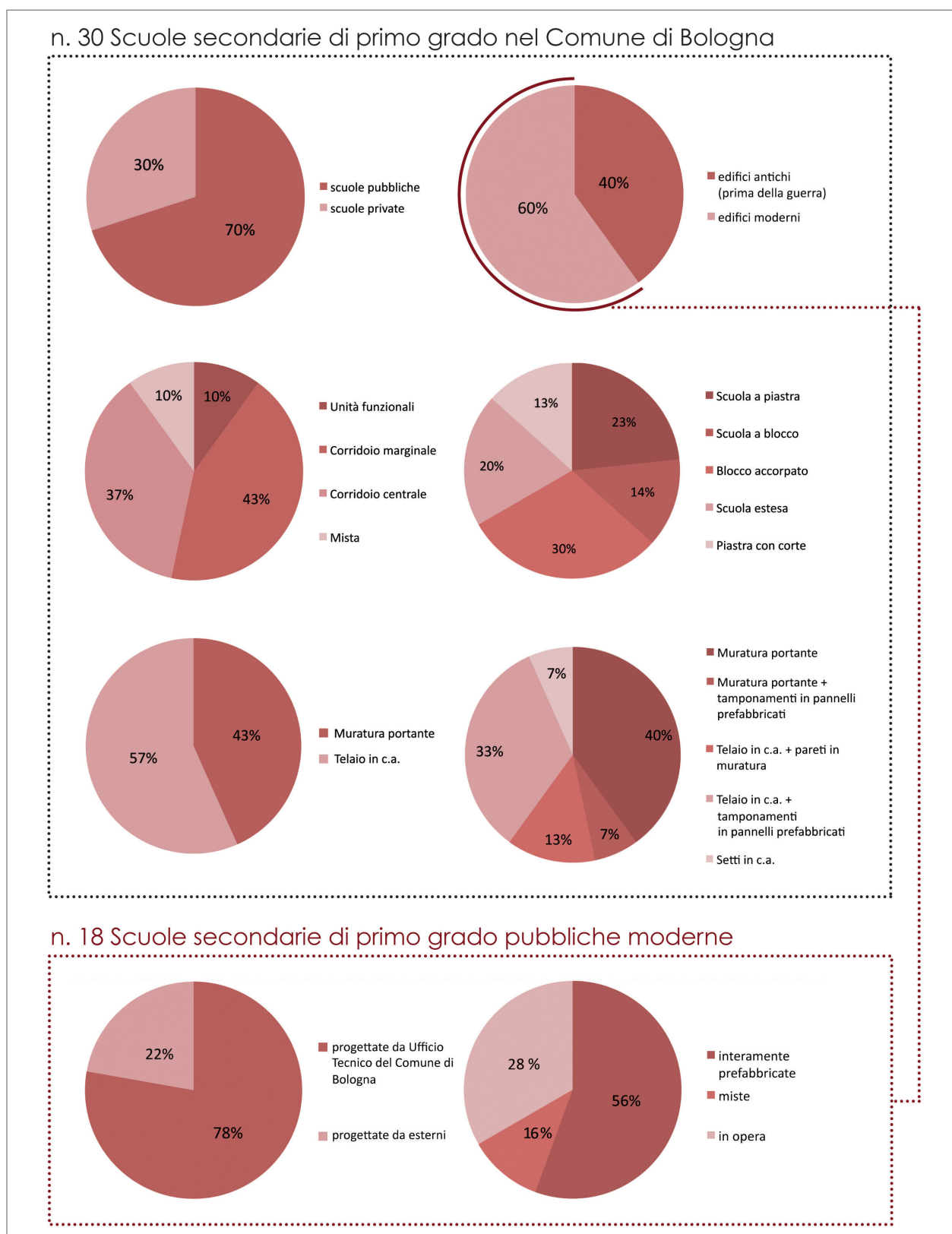
Tra gli edifici realizzati in epoca moderna, dunque a partire dal 1940, soltanto il 22% è stato progettato da architetti e ingegneri esterni, mentre il restante 78% è frutto dell'attività di progettazione dell'Ufficio Tecnico del Comune di Bologna che, come anticipato, rappresenta un nuovo organo di progettazione e gestione del patrimonio edilizio pubblico. Inoltre, è interessante rilevare come 5 scuole¹² siano state realizzate a partire dallo stesso progetto architettonico redatto dal Gruppo di Lavoro dell'Ufficio Tecnico, così come altre 3 siano state realizzate secondo un altro progetto globale.

Inoltre, il 56% di questi edifici, considerati recenti, è stato realizzato con tecniche interamente prefabbricate, l'11% con tecniche parzialmente prefabbricate e miste in opera, e il 33% realizzato in opera. Questi dati dimostrano la diffusione delle tecniche costruttive prefabbricate che, a partire dagli anni Sessanta, si diffondono su tutto il territorio nazionale, riscontrando ampio successo specialmente per le tipologie edilizie, quali quella scolastica, dedicata ad accogliere un elevato numero di persone, per molte ore della giornata, durante lo svolgimento di attività formative e lavorative.

Per quanto riguarda gli aspetti economici e politici, è possibile avanzare una ulteriore classificazione degli edifici scolastici, in relazione alle leggi che durante gli anni Sessanta e Settanta erogano finanziamenti per rispondere alla domanda di edifici scolastici. Considerando le 18 scuole

11 All'interno delle trenta scuole, è compreso anche l'I.C. n.8 "Carracci": nonostante sia stato chiuso nel 2010 per importanti degradi e gravi carenze strutturali, in attesa di demolizione e ricostruzione entro l'anno 2017, si è deciso di inserirla fra i campioni considerati dall'indagine, in quanto rappresenta un caso significativo di scuola secondaria di primo grado realizzata durante gli anni Settanta, mediante tecniche costruttive interamente prefabbricate.

12 Nonostante le scuole "Besta" siano state realizzate sulla base dello stesso progetto globale messo in atto per le scuole "Volta", "Zappa", "Dozza" e "Guercino", queste presentano un sistema costruttivo differente dalle altre: i solai infatti non sono stati realizzati con tegoli prefabbricati, bensì con solai tradizionali. Per quanto riguarda i tamponamenti esterni, invece, tutte e cinque le scuole presentano pannelli prefabbricati di rivestimento, di dimensioni di 1,20 x 1,20 m, come da progetto.



[Fig. 6] Dati statistici relativi alle differenti classificazioni svolte sulle trenta scuole secondarie di primo grado presenti nel territorio del Comune di Bologna.

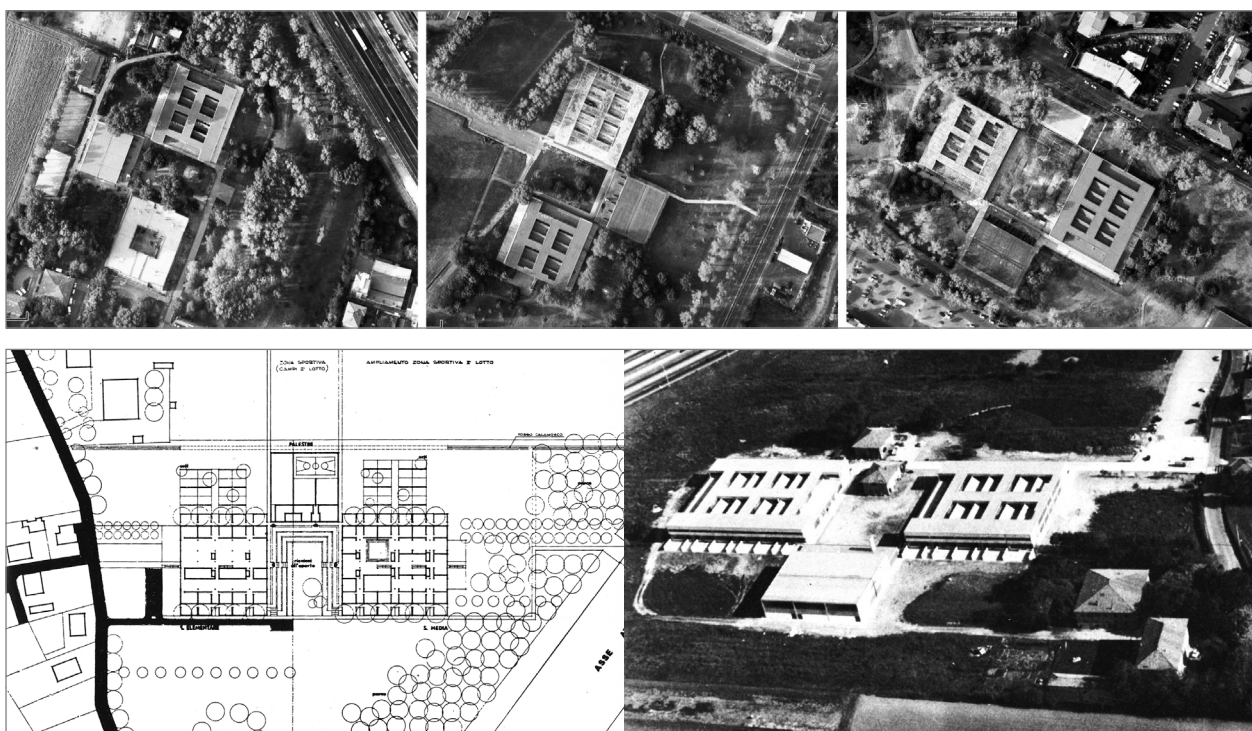
pubbliche realizzate nel secondo dopoguerra, 5 edifici sono stati realizzati grazie al finanziamento erogato in seguito alla Legge del 1967 n. 641, altri 3 edifici sono stati realizzati grazie al finanziamento erogato in seguito alla Legge del 5 agosto 1975, altri 3 hanno ricevuto finanziamenti mediante un piano di intervento straordinario a carico del Comune, mentre i restanti 7 probabilmente hanno ricevuto altri tipi di finanziamento di carattere pubblico o privato (di cui non sono state trovate informazioni).

Infine, considerando la distinzione dei caratteri distributivi enunciata sopra, è possibile classificare ulteriormente il patrimonio edilizio scolastico, rilevando i seguenti dati: delle 18 scuole pubbliche moderne, 7 presentano un modello distributivo a corridoio e 11 presentano uno schema a unità funzionali. Inoltre, di queste 18, 8 presentano un tipo edilizio a piastra, 4 presentano uno schema a blocco e 6 uno schema di scuola estesa.

Ai fini di una lettura più immediata della consistenza del patrimonio edilizio costituito dalle scuole secondarie di primo grado di Bologna, si riportano nella pagina a fianco i grafici relativi ai dati statistici appena enunciati [Fig. 6].

IV.1.4 ESPERIENZE PROGETTUALI SIGNIFICATIVE

In seguito a una accurata classificazione del patrimonio edilizio scolastico del Comune di Bologna, si ottiene il seguente quadro complessivo: il 60% delle Scuole Medie in esame (pubbliche e private) è stato costruito durante il periodo compreso tra il 1940 e il 1990, e di questi edifici il 70% è stato realizzato mediante l'impiego di tecniche costruttive integralmente o parzialmente prefabbricate. Questo dato rilevante testimonia un fenomeno che si sviluppa in tutta Italia, a partire dagli inizi degli anni Sessanta. In particolare, anche nel Comune di Bologna, la **Legge 28 luglio 1967, n.641** costituisce l'occasione per affrontare la progettazione di edifici tipizzati e ripetibili, realizzabili in tempi brevi, rispondenti ai criteri di economicità e adeguati alle esigenze di una scuola a tempo pieno. Inoltre, la redazione del progetto dell'80% delle scuole realizzate tra il 1960 e il 1990 viene affidata all'Ufficio Tecnico del Comune di Bologna, lasciata soltanto raramente a progettisti esterni.



[Fig. 7] (In alto) Ortofoto dei tre Istituti Comprensivi nel Comune di Bologna realizzati secondo il medesimo progetto: (da sinistra a destra) I.C. n.7 “Jacopo della Quercia” sito in via Scandellara, 54/3; I.C. n.12 “Farini” sito in via Popolonia, 11; I.C. “Pepoli” sito in largo Lercaro, 14.

[Fig. 8] Pianta (a sinistra) e vista aerea (a destra) dell’I. C. n.7 “Jacopo della Quercia” (Quartiere San Vitale): il progetto del complesso edilizio è stato adottato anche per gli I. C. “Farini” (Quartiere Savena), “Pepoli” (Quartiere Santo Stefano) e ancora per un I.C. situato nel Comprensorio Intercomunale, per i quali è stato semplicemente cambiato l’orientamento del manufatto.

Alla luce di quanto segnalato precedentemente in merito alla modifica della struttura dell'Ufficio che, proprio durante questi anni, viene suddiviso in tre Gruppi di Lavoro supervisionati dal Coordinatore del Lavoro Tecnologico, risulta interessante il caso della **progettazione globale di quattro Istituti Comprensivi** (Scuole Elementari e Medie "Jacopo della Quercia", "Farini", "Pepoli", e ancora un'altra scuola nel Comprensorio Intercomunale) realizzati seguendo lo stesso progetto, elaborato dalla 1° Divisione dell'Ufficio Tecnico del Comune di Bologna [Fig. 7].

Si individua subito la primaria esigenza di fornire vasti spazi a bambini e ragazzi che, trascorrendo l'intera giornata nella scuola, devono poter usufruire di un ambiente interno ampio e vario e di aree esterne attrezzate e integrate con il tessuto dei servizi di quartiere. Sul piano urbanistico, questo fattore significa scelte di aree molto estese (standard minimo di 40 m² per ogni bambino), mentre sul piano tecnico comporta il contenimento dei costi unitari in modo che al finanziamento concesso, di solito limitato, corrisponda la superficie effettivamente necessaria al "tempo pieno".

Si opera quindi su due livelli, attraverso la ricerca tecnologica dei materiali più economici e al contempo durevoli, e attraverso lo studio di soluzioni funzionali che consentano la più efficace utilizzazione della superficie interna.

La progettazione globale per questi quattro I.C., affrontata tra gli anni 1971 e 1974, si ispira ai seguenti criteri operativi:

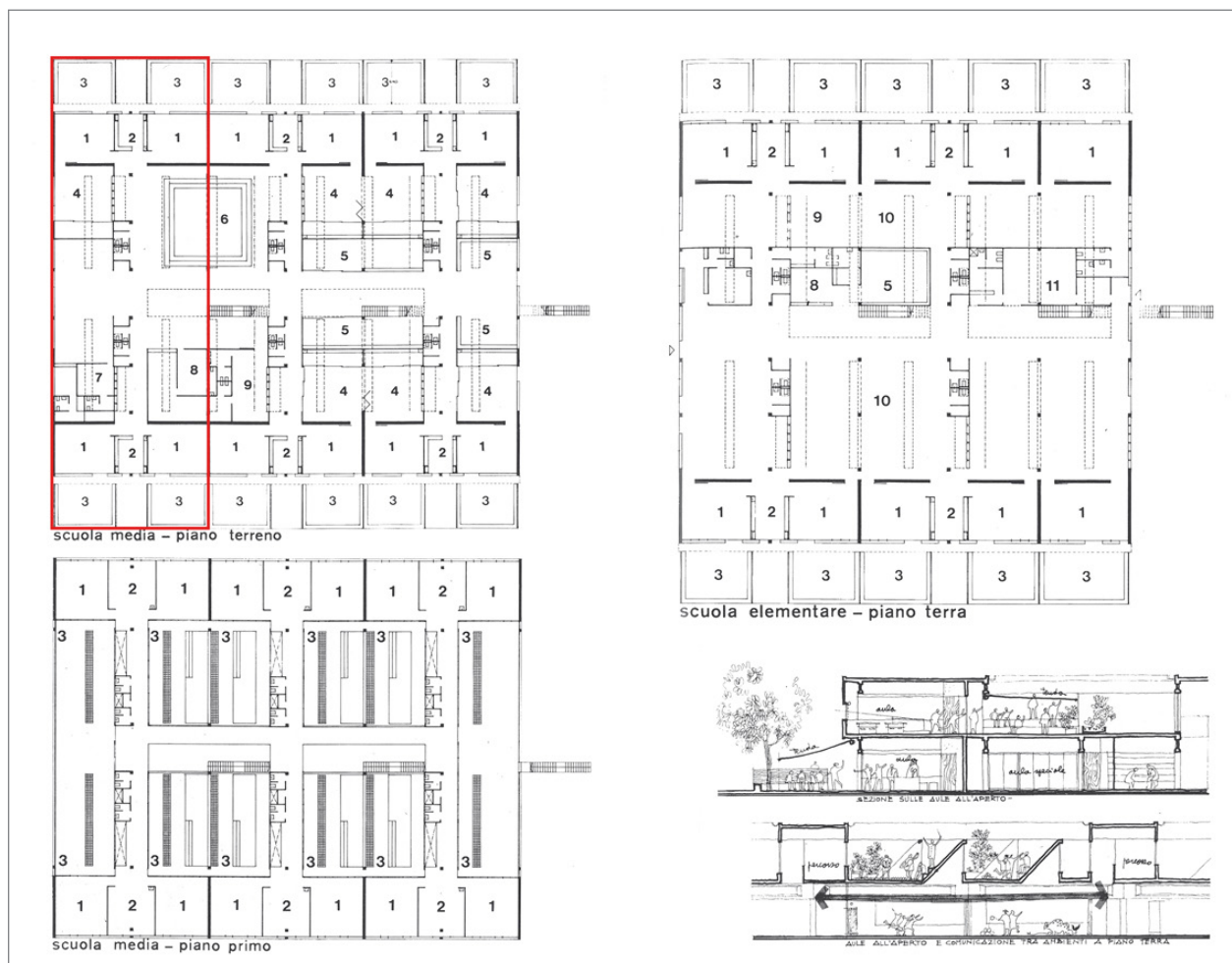
- rifiuto della scontata soluzione tradizionale aula-corridoio per rivolgersi a un organismo più complesso e ampio, adatto a una scuola rinnovata;
- realizzazione di tipologie edilizie e impianti sufficientemente flessibili da consentire adattamenti e trasformazioni a breve termine o a lunga scadenza, in modo da non vincolare la fruibilità dello spazio scolastico suscettibile di cambiare in futuro anche in misura notevole;
- promozione di interventi costituenti una premessa e una utile esperienza per una fase successiva di industrializzazione dell'edilizia scolastica, in quanto la trasformazione in atto del mondo imprenditoriale e l'urgenza di soddisfare in tempi brevi con manufatti di buona qualità la carenza ormai cronica di posti-alunno portino inevitabilmente verso questa direzione;
- attuazione di lotti funzionali autosufficienti, in quanto, essendo il finanziamento erogato in periodi differenti, risulta necessario progettare per nuclei minimi aggregabili in tempi successivi;
- costruzione con finanziamenti esigui (commisurati alle "scuole minime" proposte dalle vecchie leggi sull'edilizia scolastica) di strutture "idonee", soprattutto per quanto riguarda gli standard dimensionali, e disponibili a una effettiva gestione sociale.

Il progetto proposto, impiegato per la realizzazione di questi quattro Istituti Comprensivi identici tra loro, collocati in diversi quartieri di Bologna¹³, si articola su due piani, al fine di in-

13 I.C. n.7 "Jacopo della Quercia" - Quartiere S. Vitale, I.C. n.12 "Farini" - Quartiere Savena, I. C. "Pepoli" - Quartiere Santo Stefano, e ancora un altro Istituto Comprensivo nel Comprensorio Intercomunale

cidere in misura non eccessiva sull'area esterna, malgrado ciò sollevi alcune problematiche di disomogeneità tra le aule al piano superiore e quelle del piano terra, che vengono così a trovarsi in una situazione più favorevole. Lo schema compositivo generale è il medesimo sia per la Scuola Elementare che per la Scuola Media, in quanto si ritiene che non ci siano differenze sostanziali tra le due istituzioni, ma che sussistano soltanto differenze indotte da normative superate e in contrasto con gli stessi orientamenti pedagogici proposti dal Ministero della Pubblica Istruzione.

Ogni scuola è costituita da unità compositive elementari comprendenti 8 aule con relativi servizi, aule all'aperto, e spazi didattici integrativi, ciascuna delle quali può costituire un piccolo edificio scolastico che, aggregato ad altri, realizza strutture più complesse da 12, 16, 20, 24 aule. In questo schema [Fig. 8], il rapporto fra le aule normali e l'intera superficie utile non supera il 20%. Gli ambienti integrativi assumono quindi un peso notevole nell'economia del progetto e vengono destinati ad attività di gruppo, attrezzature speciali, servizi di documentazione e ricerca quali bi-



[Fig. 9] Progetto globale per la realizzazione di quattro Istituti Comprensivi nel territorio Comunale di Bologna: pianta delle scuola Media (a sinistra) ed Elementare (in alto a destra), e sezione (in basso a destra).

biblioteche, laboratori, atelier. Per quanto l'aula si configuri come ambiente didattico tradizionale, per ragioni normative e funzionali, viene dato notevole peso a quelle funzioni che stimolano le attitudini creative e aggregative di bambini e ragazzi, che peraltro costituiscono la manifestazione più caratteristica di una scuola formativa a tempo pieno.

Questi ambienti, comunitari o destinati al piccolo gruppo come all'attività del singolo, presentano caratteristiche di massima flessibilità (pareti scorrevoli o a soffietto, arredi mobili, banchi componibili), in modo da permettere una molteplicità di relazioni e un uso libero dello spazio da inventare volta per volta, che i bambini percorrono liberamente secondo le effettive necessità del lavoro che stanno svolgendo, e non sulla base di imposizioni passivanti. Il progetto guida per la realizzazione di queste quattro scuole prevede due blocchi uguali e simmetrici, ospitanti due livelli di scuola (Scuola Media ed Elementare), e un terzo blocco costituito dalla palestra [Fig. 9].

La scuola si configura nel suo complesso come una struttura a piastra molto compatta in cui le parti centrali sono aerate e illuminate naturalmente da shed e superfici in vetrocemento. I vantaggi sono notevoli: sul piano organizzativo delle attività interne, le relazioni tra gli ambienti risultano più dirette e molteplici; sul piano economico, i costi di costruzione e di gestione impiantistica sono ridotti notevolmente, in quanto il rapporto tra lo sviluppo delle superfici di contatto con l'esterno e la superficie di calpestio è molto inferiore rispetto a quello delle scuole organizzate in linea o secondo piante frastagliate. Per quanto riguarda le palestre, infine, esse sono progettate come edifici separati dal blocco delle aule, in quanto costituiscono strutture gestite anche dal quartiere, in cui è possibile svolgere un'attività anche indipendentemente dai tempi di apertura della scuola.

Si riportano nella tabella di seguito i dati relativi al progetto globale per i quattro Istituti Comprensivi in oggetto, realizzati tra gli anni 1971 e 1974:

PROGETTAZIONE GLOBALE DI N. 4 ISTITUTI COMPRENSIVI NEL COMUNE DI BOLOGNA	
SUPERFICIE COPERTA	2.709,69 m ²
SUPERFICIE UTILE LORDA	3.969,93 m ²
NUMERO DEI BAMBINI PREVISTI	500
NUMERO DI CLASSI	20 (ognuna da 25 bambini)
COSTI AL SETTEMBRE 1973	358.600.140 £ (esclusi arredamento, allacciamenti a utenze, costo area, spese tecniche)
GRUPPO DI LAVORO	Arch. F. Gualdi, Arch. R. Merlo, Ing. A. Paoli, Ing. P. Bottino, Geom. R. Masi, Geom. M. Simonetta, Geom. V. Rimondi, G. Buzio, A. Tebaldi, F. Benassi, G. Porcellini, R. Cavicchi, G. Pratizzoli, S. Salvatorelli

Come dimostrano queste esperienze progettuali, la Legge 28 luglio 1967, n. 641 costituisce quindi l'occasione per affrontare la progettazione di edifici per la scuola dell'obbligo tipizzati e ripetibili, poiché l'entità dell'intervento, sebbene inferiore all'effettivo fabbisogno, pone in maniera evidente l'esigenza di realizzare in tempi brevi edifici che rispondano non solo a criteri di economicità, ma che siano anche adeguati alle esigenze di una scuola a tempo pieno.

Analogamente, infatti, si può analizzare un'altra serie di casi di studio significativi, realizzati sempre dall'Ufficio Tecnico Comunale, ma durante la seconda metà degli anni Settanta, successivamente all'emanazione della **Legge 5 agosto 1975, n. 412**. Il confronto delle piante del **progetto globale di questi cinque Istituti Comprensivi** (Scuole Elementari e Medie "Dozza", "Guercino", "Besta", "Volta", "Zappa") conferma il processo progettuale vigente all'epoca, secondo cui il progetto di partenza viene elaborato dallo stesso personale tecnico, per poi essere applicato, ripetuto identicamente, per vari complessi scolastici collocati in quartieri diversi¹⁴ [Fig. 10].

Per questi cinque Istituti Comprensivi, tuttavia, si nota come venga impiegato sempre lo stesso criterio di orientamento secondo l'asse elioterminico, ossia disponendo gli edifici lungo l'asse nord-sud, inclinato di 19°: secondo le teorie elaborate durante i primi anni del Novecento, questa disposizione corrisponde alla migliore soluzione per uniformare i valori termici e luminosi.



[Fig. 10] Ortofoto dei cinque Istituti Comprensivi nel Comune di Bologna realizzati secondo il medesimo progetto. In alto, da sinistra a destra: I.C. n.1 "Dozza" sito in via De Carolis, 23; I.C. n.9 "Guercino" sito in via Longo, 4; I.C. n.14 "Volta" sito in via Biancolelli, 38/40. In basso, da sinistra a destra: I.C. n.10 "Besta" sito in viale Aldo Moro, 31; I.C. n. "Zappa" sito in via Saliceto, 74.

14 I.C. n.1 "Dozza" - Quartiere Reno, I.C. n.9 "Guercino" - Quartiere Savena, I.C. n.10 "Besta" - Quartiere San Donato, I.C. n.14 "Volta" - Quartiere Borgo Panigale, I.C. n.15 "Zappa" - Quartiere Navile

Durante gli anni di evoluzione della “scuola moderna”, tutti gli edifici realizzati da questi Gruppi di Lavoro si basano, infatti, sul medesimo schema distributivo e costruttivo, ispirato a criteri operativi volti a realizzare tipologie edilizie sufficientemente fruibili e flessibili da consentire adattamenti e trasformazioni a breve e lungo termine.

Come anticipato, in ragione dei criteri esposti sopra, viene rifiutata la soluzione tradizionale aula-corridoio, a favore dell’ipotesi di un organismo più complesso e ampio, adatto a una scuola rinnovata, che consenta ai ragazzi di usufruire di un ambiente interno vario e di aree esterne attrezzate e integrate con il tessuto dei servizi di quartiere.

Inoltre, si tende al contenimento dei costi unitari, attraverso la ricerca tecnologica dei materiali più economici, ma al tempo stesso durevoli, e attraverso lo studio di soluzioni funzionali corrispondenti al più efficace utilizzo della superficie interna, a seconda dell’entità e della modalità di erogazione dei finanziamenti.

La Legge 5 agosto 1975, n. 412 - *Norme sull’edilizia scolastica e Piano Finanziario di Intervento* costituisce una nuova occasione per la progettazione di edifici scolastici, per rispondere al meglio alle nuove richieste di posti-alunno in tutto il territorio italiano. Il finanziamento erogato per la realizzazione di nuove scuole porta a buoni risultati in quasi tutto il territorio della Regione Emilia Romagna, grazie alla rapidità e all’efficienza con cui la Regione, insieme ai Comuni e ai Comprensori, assolve i suoi compiti per definire procedure, criteri di suddivisione dei fondi e criteri di utilizzazione. Il merito è attribuibile anche alle imprese, in grado di cogliere i tempi brevi di pagamento e dunque di attivarsi per partecipare agli interventi di costruzione con il massimo impegno, nel rispetto sostanziale delle norme tecniche di attuazione, sufficientemente corrispondenti alle esigenze di scuola rinnovata.

In generale, si osserva che l’applicazione di questa legge presenta un buon successo di programmazione territoriale, in quanto tiene conto, sulla base anche delle esperienze della precedente Legge n. 641, delle esigenze di riequilibrio comprensoriale delle Scuole elementari e medie e soprattutto delle proiezioni della struttura della popolazione scolastica al 1985-1986, se non addirittura al 1989-1990, per non ripetere i vecchi errori che avevano portato alla realizzazione di Scuole senza tenere conto dell’andamento della natalità e delle migrazioni.

Inoltre, nei capoluoghi di Regione e nei grandi centri urbani, durante il processo di programmazione territoriale si considerano anche altri fattori di carattere più ampio, come ad esempio la volontà di abolire i doppi turni, di ridurre al minor tempo possibile il tragitto casa-scuola per i ragazzi pendolari che, dalla periferia, si devono recare quotidianamente alle Scuole Elementari o Medie, sulla base di un orientamento politico-culturale ormai consolidato.

La Legge n. 412 dimostra, così, che il sistema proposto di finanziamento con dotazioni poliennali che fa affidamento sulle Regioni, se basata su sani criteri sociali e su seri dati statistici, rappresenta un elemento positivo di risparmio e di sviluppo della società.

Per lo specifico caso di Bologna e del suo comprensorio, oltre alle peculiarità del sistema di finanziamento proposto, per il buon esito dell'operazione svolge ruolo fondamentale anche la politica di intervento adottata dal Comune. I criteri seguiti durante il processo di attuazione dei programmi di edilizia scolastica sono i seguenti:

- conferire immediata esecutività alle opere per soddisfare le esigenze più acute di certi Quartieri e Comuni e ridurre gli effetti negativi dell'inflazione;
- elaborare tipologie rispondenti alle reali esigenze della popolazione attraverso la verifica, con gli organismi rappresentativi democratici, delle caratteristiche funzionali e delle esigenze didattiche che determinano le scelte progettuali;
- orientare la progettazione verso strutture idonee a una scuola rinnovata in cui riqualificazione della didattica in primo luogo, partecipazione e apertura alla comunità, costituiscono gli aspetti più significativi;
- utilizzare la Legge n. 412, rilevante sul piano quantitativo e per l'ampiezza del territorio investito, per avviare una cooperazione con l'industria edilizia e promuovere una sintesi tra le esigenze dell'Ente pubblico e quelle della produzione, sensibilizzando quest'ultima verso un atteggiamento più disponibile e aperto ai problemi della scuola.

Grazie alle verifiche svolte dall'Ufficio Progetti del Comune di Bologna, si riesce così a rispondere al meglio alle finalità di una scuola rinnovata, dando alle Norme Tecniche Ministeriali l'interpretazione più aderente alle necessità del territorio bolognese. L'intero Comprensorio fa capo all'Ufficio di progettazione di Bologna con un programma di attuazione comprendente 16 Scuole Elementari e Medie, per un totale di 225 classi¹⁵. Sul piano tecnico, il problema viene affrontato elaborando un progetto tipo che consenta la costruzione degli edifici per stralci funzionali e una distribuzione della maglia strutturale tale da permettere che il progetto standard si adatti facilmente alle esigenze di ogni singolo intervento. La tipologia edilizia scaturisce sia dall'esperienza maturata durante il processo di elaborazione dei progetti precedentemente realizzati, sia dal contributo di insegnanti e operatori in occasione di numerosi incontri promossi dalla Pubblica Istruzione.

Successivamente, si procede articolando la fase progettuale in momenti di proposta, alternati a verifiche con gli organi politici decentrati (consigli di Quartiere, Comuni del comprensorio, Consigli di frazione), con gli organi interni dell'Amministrazione stessa (Pubblica Istruzione, Igiene, Manutenzione), con i distretti scolastici, con gruppi di genitori e di insegnanti delle singole scuole. Questi momenti di partecipazione cittadina alla fase progettuale comportano inevitabilmente un prolungarsi dei tempi tecnici, a fronte però di una maggiore accuratezza e completezza dei progetti elaborati.

¹⁵ Omicini L., *L'attuazione della Legge n.412 del 1975 a Bologna. Relazione dell'Assessore all'Edilizia Pubblica Luigi Omicini al seminario sugli edifici scolastici "Quale necessità, quale committenza, quale produzione"* - Regione Emilia-Romagna 13 ottobre 1979, in Aa. Vv., "Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975", Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975, pp. 35-37.

Realizzare interventi di tali dimensioni in tempi ristretti rappresenta un'occasione insostituibile per orientare le imprese già impegnate nella prefabbricazione verso l'edilizia per la scuola. Questa scelta viene fatta dall'Amministrazione che individua nella prefabbricazione le condizioni ottimali per far fronte a programmi di vasto respiro, garantendo livelli qualitativi e tempi di esecuzione controllabili.

Nei limiti del possibile, la minima variabilità e differenziazione delle soluzioni progettuali viene affidata sostanzialmente all'arredo, più che alla disposizione di elementi murali secondo schemi ben precisi, in modo tale da permettere la massima standardizzazione dei componenti edilizi e favorire, così, un unico sistema di prefabbricazione per le 16 Scuole.

Tuttavia, dal punto di vista pratico e operativo, l'attuale legislazione in materia di regolamento degli appalti risulta inadeguata a risolvere alcuni tipi di problemi. Pertanto, si prevede di svolgere la licitazione privata, adottando alcuni accorgimenti per superare questi limiti:

- scelta di una prefabbricazione aperta che consenta in larga misura l'adozione di componenti industrializzati di uso corrente nel mercato;
- adozione di una tipologia strutturale flessibile che permetta l'uso di sistemi di costruzione differenziati tra sistemi di prefabbricazione totale o, in alternativa, uso misto di componenti industriali e tecnologia tradizionale;
- sperimentazione di tutte le gare d'appalto relative al I stralcio di finanziamenti (11 scuole con 147 aule) alla stessa data e ora, in modo da indurre le imprese interessate a realizzare l'intero lotto di Scuole e giustificare la messa a punto di sistemi costruttivi specifici per il territorio intercomunale bolognese.

Nella direzione di una sempre maggiore ottimizzazione di tempo e di risorse economiche, l'Amministrazione locale prevede anche una più facile direzione dei cantieri, organizzando un unico centro di coordinamento: si rileva come questa fase del lavoro risulti però particolarmente complessa, in quanto il Consorzio Cooperative di Produzione affida ogni cantiere a cooperative diverse, ciascuna caratterizzata da strutture produttive differenti. Ne derivano disomogeneità nell'affrontare le soluzioni tecniche, oltre che notevoli difficoltà organizzative nella conclusione dei lavori, in quanto l'esigenza di fornitura contemporanea di alcuni materiali crea rallentamenti in alcuni cantieri.

Nell'attuazione del II stralcio, si provvede quindi a scaglionare nel tempo gli appalti, in modo tale che la conclusione di un cantiere non vada a interferire con gli altri, ottenendo un bilancio in gran parte positivo. Su 11 appalti, soltanto un edificio viene integralmente prefabbricato, mentre 9 fanno largo uso di componenti prefabbricati, e soltanto uno è stato realizzato con tecniche tradizionali.

I tempi di esecuzione vengono rispettati con leggeri slittamenti, per cui alla fine degli anni Settanta si può affermare che l'intero programma della Legge n. 412 è stato attuato o si trova in

fase di completamento. Inoltre, i costi delle opere murarie e degli impianti sono mantenuti entro i limiti corretti (175.000 £/m² per una scuola da 24 classi di 5.258 m²), compresi i costi di impianto per i componenti prefabbricati, dimostrando la complessiva positività dell'esperienza funzionale delle scuole.

Durante l'attuazione del II stralcio di finanziamenti vengono migliorate alcune soluzioni tecnologiche e, certamente, la possibilità di realizzare preliminarmente un prototipo degli elementi costruttivi proposti, prima di metterli in opera, avrebbe portato a risultati migliori rispetto a quelli conseguiti. Alla luce delle analisi svolte sullo stato conservativo attuale delle scuole realizzate nel territorio del Comune di Bologna, i cui risultati sono esposti all'interno dell'*Appendice*, queste esperienze progettuali dimostrano e confermano ancora una volta l'importanza di procedere mediante sperimentazioni costruttive all'interno dell'intero processo progettuale.

IV.2 EDILIZIA PREFABBRICATA (1960-80)

IV.2.1 PROCESSO DI INDUSTRIALIZZAZIONE IN AMBITO EDILIZIO

Durante il periodo compreso tra gli anni 1960 e 1980, per ragioni di tipo economico, si assiste all'evoluzione tecnologica e culturale di ogni tipo di attività, tra cui anche l'edilizia, nell'intento di attuare una riduzione dell'incidenza della mano d'opera che, seppur a fronte di un incremento dei costi di investimento, porta comunque a un bilancio ridotto del costo complessivo. Nello sforzo per la minimizzazione degli oneri del lavoro manuale, appare essenziale la riduzione dell'incidenza dei costi di lavorazione in opera e, in particolare, la rilevante manodopera per i casseri di contenimento dei getti di calcestruzzo.

In tal senso, la prefabbricazione si propone validamente, in quanto consente una elevata produttività, con procedimenti di tipo industriale, di elementi costruttivi da posizionarsi in sito, mediante operazioni prevalentemente di montaggio a secco. Tra le svariate soluzioni costruttive innovative sviluppate durante questi anni, elaborate in sinergica collaborazione tra gruppi di ricerca e ditte costruttrici, si nota un largo uso dei sistemi di prefabbricazione con elementi lineari all'interno del patrimonio edilizio scolastico realizzato nel territorio del Comune di Bologna.

Questa tecnica costruttiva si propone di riprodurre gli schemi statici delle strutture di edilizia tradizionale, ossia gli schemi a ossatura portante, in cui gli elementi principali sono costituiti da pilastri e travi (a geometria monodimensionale o lineare) mentre piastre di solaio e pannelli di tamponamento, a loro volta portati dall'ossatura principale, completano il manufatto. Per l'edilizia industriale e scolastica, la prefabbricazione lineare risulta di immediato impiego in quanto, separando le funzioni portanti da quelle di tramezzatura e partizione ambientale, offre la possibilità di raggiungere ampie maglie strutturali, con l'adozione di travi in c.a.p., a elevata libertà e flessibilità per le disposizioni in pianta.

Rispetto a quanto accade negli altri paesi europei [Fig. 11-14], in Italia la costruzione industrializzata si diffonde con lieve ritardo, all'inizio degli anni Sessanta. Infatti, nel secondo dopoguerra, mentre la maggior parte delle nazioni europee adotta l'industrializzazione come modello strategico per la ricostruzione, le scelte politiche italiane la rifiutano, optando per la manodopera specializzata come strumento di sviluppo edilizio e, al contempo, di riduzione della disoccupazione.

Soltanto alla fine del boom economico, sotto le condizioni sociali e politiche favorevoli, anche in Italia vengono riconosciute le potenzialità dell'industrializzazione per un suo progressivo affermarsi. In questo contesto, si avverte la necessità di realizzare, rapidamente e a basso costo, milioni di metri cubi di edilizia residenziale pubblica per rispondere alle problematiche emerse con l'urbanizzazione di massa e, parallelamente, centinaia di complessi di scuole pubbliche, per

far fronte alle necessità emerse in seguito alla riforma scolastica, che introduce la Scuola Media unificata obbligatoria.

In questo contesto di emergenza, caratterizzata da una significativa carenza di manodopera nel settore edilizio, dovuta alla diminuita disoccupazione negli anni del boom economico, la prefabbricazione e l'industrializzazione edilizia sembrano la soluzione ottimale per risolvere tutte le problematiche emerse.

Mentre i primi sistemi prefabbricati vengono importati da altri paesi europei, in particolare da Francia e Inghilterra, a volte acquistando attrezzature già dismesse nelle nazioni ideatrici, in una fase successiva gli italiani sviluppano nuove soluzioni costruttive, in linea con le prerogative produttive italiane. A partire dalla metà degli anni Sessanta, però, i risultati deludenti portano a rivedere il problema dell'economia di scala: le soluzioni tecniche scadenti si accompagnano, infatti, ad esiti architettonici discutibili, ad eccezione di rari casi esemplari. In questo contesto insoddisfacente, si sviluppa la fase più importante del fenomeno di industrializzazione globale del settore edilizio in Italia, caratterizzato dalle fondamentali sperimentazioni costruttive e dalla razionalizzazione del processo produttivo e di cantiere. In seguito alle numerose sperimentazioni, vengono brevettati nuovi sistemi costruttivi, prevalentemente basati su grandi pannelli prefabbricati in conglomerato cementizio armato per le pareti e per i solai¹⁶ oppure su più complessi elementi tridimensionali¹⁷, specialmente in alcune regioni come Lombardia e Piemonte.



[Fig. 11-14] Esempi di edilizia prefabbricata in Europa durante gli anni Sessanta: (da sinistra) Finlandia, *Sistema Lohja* costituito dall'assemblaggio di cellule tridimensionali; Francia, *Sistema Pascal* costituito dall'assemblaggio di pannelli tipo multistrato di facciata, da abbinare a pannelli di partizione interna e a orizzontamenti di solaio; Germania, *Sistema prefabbricato* costituito da struttura portante prefabbricata, solai a TT e pannelli di facciata tipo sandwich; Gran Bretagna, *Sistema prefabbricato* costituito da pilastri angolari collegati alla sommità da tronchi di trave aggettanti, con funzione di mensole di appoggio, su cui poggiano le travi di bordo che portano le piastre nervate del solaio.

16 Ad esempio, si veda il sistema *Sacie-Koncz* a Milano, sistemi *Borini* a Torino, sistema *Teo* della Valdadige

17 Ad esempio, si vedano i procedimenti *Zanussi-Farsura*, *Uniquarto*, *Triedro*, *Elle*

Parallelamente alla sperimentazione in cantiere di sistemi costruttivi sempre più evoluti, si innesca un dibattito che coinvolge in prima linea la ricerca universitaria, in merito agli aspetti più tecnici dell'architettura: le indagini scientifiche in campo edile sono volte all'unificazione dimensionale, alla standardizzazione e al controllo della qualità, alla programmazione e soprattutto ai metodi progettuali. In linea con le nuove tecniche, anche l'impresa edile si aggiorna e, per la prima volta dopo decenni, si allontana dall'approccio tradizionale ancora saldamente legato alla costruzione mista in muratura e cemento, interamente realizzata in opera, adottato fin dall'inizio del Novecento.

Il dibattito in tema di edilizia prefabbricata si diffonde in tutti gli ambiti industriali e scientifici, coinvolgendo oltre alle imprese e alle industrie produttrici anche l'Università, la politica, e gli ambienti culturali in generale. A dimostrazione dell'ampiezza del fenomeno, si riportano i principali eventi che durante gli anni Sessanta si sviluppano in Italia, contribuendo alla progressiva estensione e ottimizzazione del fenomeno di industrializzazione.

Nel 1960, a Napoli si tiene la III Edizione della *Fiera della Casa*, che registra la presenza di numerose ditte appartenenti a diversi settori, dalla tecnologia dei materiali da costruzione, alla realizzazione di case prefabbricate. Nell'ambito delle varie manifestazioni fieristiche, il *Convegno sulle prospettive economiche e tecniche dell'edilizia* si dedica al tema dell'industrializzazione edilizia, con il patronato delle Facoltà di Ingegneria e di Architettura di Napoli e dell'INARCH¹⁸. In particolare, le tre relazioni principali del Convegno trattano i seguenti argomenti¹⁹: “Edilizia residenziale e sviluppo economico” (De Luca M.); “Possibilità di impiego delle nuove tecniche” (Mango R.); “L'industria di fronte alla costruzione” (Ciribini G.). In particolare, il Prof. Mango²⁰, durante la sua relazione, esplicita chiaramente le linee guida verso cui si sarebbe orientata l'edilizia del decennio seguente, attribuendo per la prima volta grande importanza all'apporto dell'industria alla costruzione, come fattore culturale e non soltanto strumentale.

Inoltre, sempre nell'anno 1960, l'A.I.P. (Associazione Italiana Prefabbricazione) promuove un'iniziativa per la diffusione dell'edilizia industrializzata, con l'ausilio della redazione di un *Catalogo dei materiali e procedimenti nuovi per l'edilizia e la prefabbricazione*. Questo catalogo, che nasce come censimento preliminare, può essere utilizzato per il rilascio dei certificati di idoneità tecnica ai nuovi prodotti edilizi italiani. La redazione avviene attraverso la diffusione presso le ditte produttrici di una scheda campione contenente tutte le informazioni necessarie per la caratterizzazione e l'applicazione di ogni elemento prefabbricato, disposizione dei progettisti.

18 INARCH - Istituto Nazionale di Architettura

19 Talanti A. M., *Storia dell'industrializzazione edilizia in Italia 1945-1974*, A.I.P. (Associazione Italiana Prefabbricazione per l'edilizia industrializzata), Milano 1980, p. 70.

20 Mango R., *Possibilità di impiego di nuove tecniche*, in “Prefabbricare”, n. 2, 1960.



[Fig. 15-21] (Dall'alto, da sinistra) Edificio prefabbricato in fase di costruzione costituito da una struttura portante in c.a. abbinata a pannelli sandwich di facciata prefabbricati in cls leggero (Tavagnacco, Udine); Fabbrica rivestita da pannelli prefabbricati con superficie decorata a basso rilievo (Nord Italia); Magazzini Generali Supermarkets Italiani (Seggiano Limite, Milano) realizzati dall'Impresa Morganti; Stabilimento Arm Italia rivestito da pannelli curvi finiti con uno strato di graniglia rosata, progettato dall'Arch. Mangiarotti (Cisinello Balsamo, Milano); Stabilimento Barilla rivestito da pannelli di grande altezza, sagomati e nervati (Pedrignano, Parma); Pannelli a faccia vista con elementi lineari disegnati da Prefabbricati Quaranta (Nord Italia); Stabilimento Confezioni Bertotto Modesto rivestito da pannelli verticali in cemento bianco, con superficie esterna curvilinea, realizzati da Precem (Sandignano, Vercelli).

Il fenomeno dell'industrializzazione edilizia in Italia, durante gli anni 1960-70, naturalmente comporta significative trasformazioni nella struttura organizzativa del processo edilizio per quanto riguarda le fasi di programmazione, progettazione e costruzione, determinando inoltre alcune modifiche dell'assetto tecnico-economico delle imprese di costruzione, sia private, che associate in forma cooperativa. Verso la metà degli anni Sessanta, in diverse città italiane si assiste ai primi interventi di realizzazione di edifici e talvolta di interi quartieri, mediante l'utilizzo delle nuove tecniche costruttive²¹.

La prefabbricazione viene prevalentemente impiegata per componenti strutturali, ma anche per pareti esterne e partizioni interne, come strutture portanti a pannelli pesanti. In alcuni casi l'adozione di procedimenti industrializzati rappresenta l'oggetto di autonoma decisione da parte delle imprese in sede di esecuzione, per ottenere un vantaggio economico dal punto di vista tecnico e della riduzione dei tempi.

Prefabbricazione, modularità, leggerezza, trasportabilità e flessibilità diventano allora le parole chiave di un nuovo sistema costruttivo e, in senso più ampio, di un nuovo stile di vita, le cui diverse modalità di realizzazione sono rappresentate dai sistemi modulari prefabbricati e ripetibili. Dal punto di vista della progettazione architettonica, questo nuovo tipo di produzione basato sull'industrializzazione attribuisce grande importanza all'estetica del prodotto finale, in relazione alla possibilità di un effettivo risparmio, spesso indice di una corretta progettazione²² [Fig. 15-21].

Durante il corso degli anni Sessanta, sono molteplici le iniziative, i Convegni e le sperimentazioni costruttive nel campo dell'industrializzazione dell'edilizia. Infatti, alla luce delle esperienze europee, si riconosce nella prefabbricazione la nuova frontiera dell'edilizia, in quanto tecnica innovativa in grado di garantire vantaggi non soltanto economici, ma anche costruttivi e distributivi, legati alla possibilità di ottenere una maggiore flessibilità negli spazi, velocizzandone le tempistiche di costruzione. Per tutte queste ragioni, si investe sempre maggiormente nella ricerca in questo campo, così come nella sensibilizzazione al problema, in quanto si attribuisce sempre maggiore importanza alla sperimentazione come metodo per migliorare e affinare le tecniche.

Lo sviluppo dei processi industrializzati per la realizzazione dell'edilizia prefabbricata viene favorito durante questi anni dagli Enti pubblici che commissionano edifici adibiti a rispondere in modo rapido ed economico alle carenze di spazi idonei per lo svolgimento delle attività sociali e formative²³.

21 Alcuni esempi di realizzazioni di edilizia prefabbricata nell'Italia degli anni Sessanta: il quartiere Levante Emilia a Bologna; il quartiere residenziale di Gratosoglio a Milano, svolto dall'Istituto Autonomo Case Popolari; il quartiere Torri Cintonia a Firenze.

22 D'Arconte L., Frateili E., Cicconcelli C., *La prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, in Ministero della Pubblica Istruzione (a c. di), "Quaderni del centro studi per l'edilizia scolastica", Le Monnier, Firenze 1965.

23 Nella relazione tenuta dall'Ing. Antonio Franco – Presidente della 1° sezione del Consiglio dei Lavori Pubblici al *Convegno nazionale sui problemi dell'industrializzazione edilizia*, svoltosi a Bologna nel 1965, viene infatti posta l'attenzione sulla funzione espressa dalla committenza pubblica nel favorire lo sviluppo dei processi e metodi di indu-

In particolare, gli edifici scolastici realizzati secondo questo intento, durante gli anni 1960-80, rappresentano molteplici occasioni per la sperimentazione e la messa a punto di nuove tecniche prefabbricate e di nuovi procedimenti costruttivi. Naturalmente, le inevitabili conseguenze architettoniche e costruttive derivanti da questa metodologia di intervento consistono nella tendenza all'uniformità delle soluzioni progettuali, e alla carenza di soluzioni alternative, fatta eccezione per alcuni casi degni di nota che vedono la progettazione di scuole dagli esiti estetico-architettonici soddisfacenti [Fig. 22].

Le risposte alle tematiche sollevate dall'esigenza di una riorganizzazione scolastica aperta alle istanze di rinnovamento sociale, che comprenda tanto gli aspetti pedagogici quanto quelli funzionali e organizzativi, vengono ricercate in un più ampio contesto di inquadramento all'interno di un piano di intervento dotato della maggiore affidabilità possibile. In questo senso, un processo di industrializzazione nella realizzazione delle opere, possibile con un rapporto corretto con gli organismi produttivi, presenta molteplici significativi vantaggi: controllo degli standard qualitativi; semplificazione delle modalità di realizzazione; maggiore rapidità di esecuzione; semplificazione del controllo dell'esecuzione; maggiore affidabilità della rispondenza fra progetto e realizzazione.



[Fig. 22] Scuola elementare a Chioggia (Venezia), progettato dall'Arch. S. Lenci, realizzato dall'Impresa Leonori mediante il Sistema Leonori, costituito dall'assemblaggio di una struttura portante in cemento armato, abbinata a pannelli di facciata prefabbricati rifiniti con ghiaietta a vista, caratterizzati in senso formale da grandi aperture circolari.

rializzazione del settore edilizio in Italia: "(...) L'esperienza effettuata nel campo dell'edilizia scolastica ha permesso di agevolare lo sviluppo di vari sistemi di prefabbricazione, ponendo le strutture in condizioni concorrenziali". (C.I.E. Centro Italiano dell'Edilizia (a c. di), *Problemi della industrializzazione dell'edilizia: Atti del Convegno Nazionale promosso dal C.I.E. - Bologna 16-17 Ottobre 1965*, Giuffrè Editore, Firenze 1966.)

Da questi primi vantaggi consegue immediatamente l'economia dell'opera, peraltro già ampliata dalla possibilità di controllo sui costi di realizzazione, e dunque in definitiva sui prezzi, così come dalle economie raggiungibili con la produzione di grandi quantità di componenti. Tutti questi fattori consentono all'ente locale di formulare programmi di investimenti cui corrisponda un'effettiva realizzazione delle opere nel rispetto dei tempi previsti.

Un rapporto di questo tipo è accettabile solo nella misura in cui l'ente locale riesca a gestire l'intervento salvaguardando i compiti che gli sono propri, quali la formulazione dei piani di intervento in relazione al fabbisogno espresso dai cittadini, come importante strumento di pianificazione e riequilibrio del territorio, e la loro traduzione grazie a una attenta assegnazione dei finanziamenti, secondo le priorità individuate. Spesso, però, tale condizione non si realizza, a causa di due principali motivazioni: in prima istanza, la mancanza di volontà del governo di operare una effettiva scelta di decentramento, mantenendo inalterati i meccanismi burocratici di controllo sui pochi finanziamenti concessi; in secondo luogo, l'effettiva carenza di alcune amministrazioni comunali che, spesso, non si rivelano in grado di far fronte ai problemi tecnici in maniera soddisfacente²⁴.

In questo contesto, si inseriscono le iniziative di grossi enti produttori che operano a livello regionale e nazionale, tendenti a creare una situazione di monopolio in questo e in altri settori dell'intervento pubblico, manovrando i finanziamenti in relazione a progetti tipo, realizzati a livelli superiori esterni, ed ereditati a livello di base senza alcuna verifica.

Durante questi anni si va sempre più chiarendo un rapporto di collaborazione fra il Consorzio delle Cooperative di Produzione e Lavoro e la struttura tecnica dei comuni, conforme ai presupposti di autonomia dell'ente locale espressi precedentemente. Tale fenomeno è reso possibile grazie alla disponibilità da parte di questa struttura produttiva a recepire le esigenze e a tradurle in termini progettuali secondo le formulazioni della metodologia di intervento, così come da parte dei progettisti ad adottare soluzioni tecnologiche compatibili con le caratteristiche di produzione corrente. Le considerazioni che si possono formulare in seguito a questa prima esperienza risultano importanti, in quanto dimostrano la possibilità di avviare realmente un rinnovo del processo progettuale secondo un approccio innovativo e collaborativo.

Nel contesto sociale ed economico italiano degli anni Sessanta, caratterizzato dalla crescita demografica, dalla concentrazione urbana con il relativo flusso di emigrazioni interne conseguente all'espansione industriale, e dal crescente impiego di mano d'opera femminile, si avverte la necessità di un rinnovamento in vari ambiti, tra cui quello formativo e pedagogico.

Tuttavia, la forte necessità di edifici scolastici, che caratterizza anche la realtà bolognese degli anni Settanta, si scontra con la scarsa disponibilità finanziaria degli Enti locali e con i tempi

24 Gabriele L., Merlo R., *Processi di industrializzazione nel settore dell'edilizia scolastica*, in Aa. Vv., "Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975", Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975, p. 59.

troppo lunghi di costruzione. Inoltre, la critica al rapporto pedagogico gerarchico e alla forma tradizionale di trasmissione del sapere, ora considerata improduttiva e superata, si affianca in questi anni alla articolata e complessa attività dei progettisti di strutture scolastiche, che devono far fronte agli interrogativi relativi alle funzioni degli spazi architettonici, al rifiuto di una determinata committenza, all'incapacità di esprimersi secondo un nuovo linguaggio architettonico, che molto si discosta dai canoni estetici associata alla produzione borghese.

Proprio durante questi anni, appare chiaro come un valido rapporto pedagogico possa collocarsi all'interno di spazi neutri e come esso stesso, per la sua dinamica positiva e fertile, possa dare forma a questo spazio. Infatti, secondo l'accezione moderna del sistema, lo spazio architettonico dedicato a questa funzione sociale non è concepito come un luogo realizzato soltanto da forme funzionali, bensì come luogo di "produzione" di nuovi rapporti sociali.

In quest'ottica, fin dal 1967, l'Amministrazione comunale bolognese, prima ancora di intraprendere una attività di rapida realizzazione di nuovi edifici scolastici secondo le tecniche prefabbricate, coglie l'occasione per recuperare edifici abbandonati per adibirli alla nuova funzione educativa. Il Comune si rivolge quindi alla riqualificazione di case coloniche abbandonate o di antiche ville disabitate, colte come occasione stimolante per la trasformazione di spazi "morti" in scuole, adattandoli alle esigenze funzionali e sociali richieste, ed evitando di ricorrere alla ricerca, spesso forzata, di nuove forme per l'edilizia scolastica.



[Fig. 23] Sistemi costruttivi prefabbricati impiegati per la realizzazione di edifici industriali, così come per l'edilizia scolastica: (a sinistra) interno di una fabbrica automobilistica, caratterizzata da un sistema di pilastri prefabbricati, sui quali poggia la struttura a shed composta da travi reticolari a denti di sega, montata su travi principali ad anima piena (sistema RDB); (a destra) interno di una scuola materna, caratterizzata da una struttura organizzata su tre assi spaziali, in cui la direzione verticale è assunta da un montante e le due direzioni orizzontali da una trave e dal solaio, a scandire la distribuzione degli spazi architettonici che prendono luce da ampie vetrate modulari laterali e da shed in copertura.

Contemporaneamente, fra i tanti interventi di recupero dell'esistente studiati e attuati in questa direzione, si presenta un'occasione unica: un capannone industriale abbandonato in un quartiere a Castel Maggiore (Bologna) in cui si avverte l'esigenza improrogabile di realizzare una Scuola Media. L'occasione si presenta simultaneamente all'evidenziarsi di un importante fenomeno sociale che vede la trasformazione della scuola da istituzione a servizio. In questo senso, il capannone recuperato per fornire in modo rapido ed economico una Scuola Media si distacca completamente dal monumentalismo dell'istituzione, per affermare chiaramente l'autentica funzione scolastica secondo la concezione di questa epoca di scuola democratica e moderna.

Lo spazio del capannone industriale a shed, creato quando la rivoluzione industriale lo indica come ambiente migliore e maggiormente idoneo per lo svolgimento dell'attività lavorativa, si dimostra singolarmente adatto per contenere anche nuove istanze di spazio pedagogico autogestito. Il monumentalismo dell'istituzione scolastica si trasforma in tal modo in uno spazio architettonico anonimo, privo di qualsiasi carattere architettonico-costruttivo specifico, atto ad accogliere un servizio sociale²⁵.

Questa prima esperienza individua nell'utilizzo di strutture in conglomerato cementizio armato di tipo industriale la tipologia edilizia idonea per la realizzazione di questi spazi, mediante l'assemblaggio in opera di componenti prefabbricati, generalmente usati per la costruzione di capannoni industriali, per dare forma ad ambienti adibiti a servizi scolastici di diverso grado [Fig. 23].

Sulla base di questo principio, dal 1970 al 1975, vengono realizzati nel Comune di Bologna una quindicina di edifici scolastici di diverso grado. La validità di queste esperienze costruttive è confermata da alcune prime considerazioni di tipo tecnico ed economico: l'utilizzo di strutture standard permette una riduzione pari al 30% dei costi, rispetto a quelli dell'edilizia scolastica tradizionale e, al contempo, una riduzione notevole dei tempi realizzativi, rendendo possibile la costruzione di un edificio in sei mesi circa, dall'inizio dei lavori all'entrata in funzione dell'edificio.

Il passaggio della scuola da istituzione a servizio, a livello architettonico e sociale, non avviene soltanto attraverso la semplicità e povertà esterna dell'edificio, ma soprattutto per mezzo dell'accurata progettazione degli interni, volta a migliorare la gestione delle attività poste alla base del rapporto sociale pedagogico, secondo la concezione moderna. Ne risulta un assemblaggio di spazi alternativi di dimensioni e qualità diverse, collegati fra loro non solo orizzontalmente ma anche verticalmente, in un insieme omogeneo e sempre in stretta comunicazione con l'esterno.

Tale attenzione per l'interno privilegia naturalmente la progettazione di un nuovo arredo scolastico che finora, sul mercato, aveva subito soltanto un aggiornamento formale, restando so-

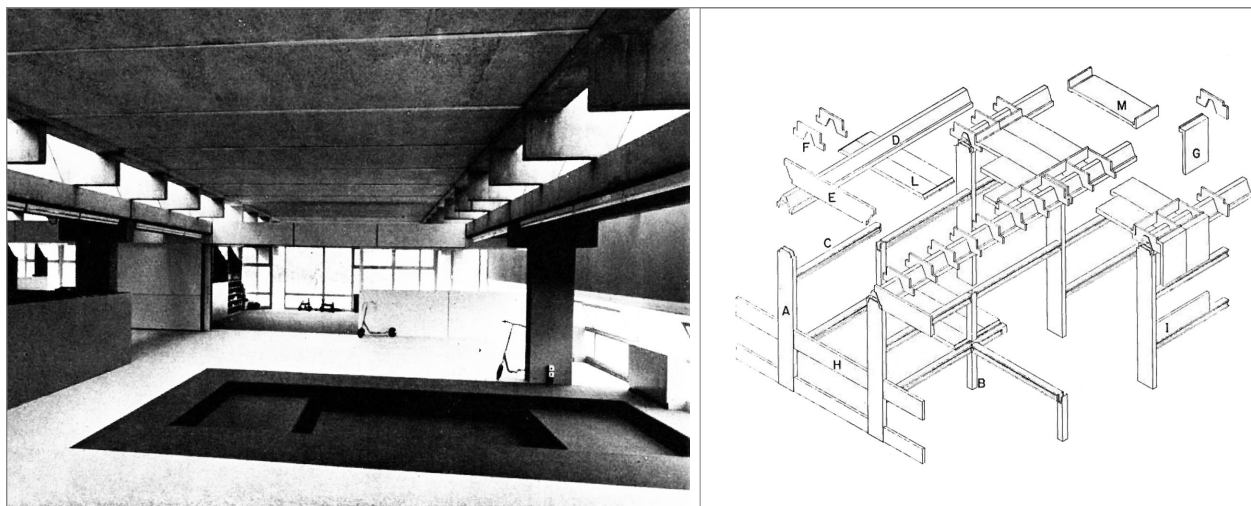
25 Salomoni C., *Strutture per la scuola di base - Tipo 6 (Castel Maggiore) e Tipo 7 (Via Vezza)*, in Aa. Vv., "Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975", Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975, pp. 132-134.

stanzialmente legato ai vecchi metodi tradizionali d'insegnamento. L'arredo costituisce, infatti, la prima e vera appropriazione dal basso dello spazio pedagogico e, dunque, lo strumento primo di gestione di tale spazio, simbolo della partecipazione attiva degli utenti dei servizi scolastici all'intero processo critico ed evolutivo degli edifici scolastici.

L'aspetto architettonico formale dell'istituzione scolastica si è sempre caratterizzato con la chiara e assoluta separazione tra l'interno e l'esterno, e viceversa. Le finestre alte che caratterizzano le facciate introverse, le poche indispensabili porte verso l'esterno e le numerose porte interne per la suddivisione di luoghi separati servivano a segregare gli scolari e, al contempo, a isolare gli ambienti scolastici dal contesto urbano cittadino circostante.

Secondo la nuova concezione di edificio scolastico, si ricerca la massima flessibilità degli spostamenti, mediante la realizzazione di spazi diversi, collegati fra loro anche in senso verticale, in continua comunicazione con l'ambiente esterno. Inoltre, la realizzazione di tetti praticabili, di muri esterni percorribili per mezzo di scale, di pianerottoli e terrazze rappresenta la completa integrazione degli spazi interni ed esterni dedicati all'istruzione scolastica, necessaria per dare vita a un nuovo tipo edilizio, idoneo per lo svolgimento delle attività formative.

In particolare, la Scuola Media si inserisce all'interno dell'insieme di criteri pedagogici volti a trasformare la scuola in uno spazio unificato, atto allo svolgimento integrato delle attività formative e ricreative, come successione di momenti variamente articolati. Secondo i criteri espressi durante gli anni Sessanta e Settanta, le attività pedagogiche previste riguardano attività di tipo teorico



[Fig. 24] *Sistema Benini 2* impiegato per realizzare scuole costituite da una struttura composta da elementi totalmente prefabbricati: (a sinistra) vista interna di una scuola materna, caratterizzata dall'assemblaggio di travi di copertura ed altri elementi lineari orizzontali appoggiati che contribuiscono a distribuire la luce. (A destra) L'intero fabbricato viene realizzato impiegando sistema costituito dall'assemblaggio in opera dei seguenti elementi: A) pilastro 30x120 cm, B) Pilastro 40x40 cm, C) Trave a X, D) Trave a V, E) Trave di testata, F) Setto, G) Pannello appeso, H) Pannelli ad incastro, I) Pannello parapetto, L) Solaio di piano, M) Pannello solaio di copertura.

(lavoro individuale o di gruppo, lettura e studio), di tipo pratico (sperimentazione e osservazione scientifica, applicazione tecnica, attività musicale e artistica, svolte prevalentemente in gruppi) e di tipo parascolastico e associativo (informazione, comunicazione, gestione, svolte per gruppi o individualmente).

Come indicato dal D.M. 18 dicembre 1975, lo spazio per l'unità pedagogica permette lo svolgimento sia delle attività individuali, sia di quelle di gruppo di media dimensione. Inoltre, le caratteristiche funzionali di questo spazio consentono una facile trasformazione da aula normale in aula speciale, integrandosi spazialmente e visivamente con gli altri ambienti della scuola, rispondendo così all'esigenza di rendere lo spazio dell'aula complementare all'intero spazio della scuola, garantendo anche la massima riduzione di disimpegni e corridoi.

Gli spazi per l'insegnamento specializzato, destinati alle osservazioni scientifiche e alle applicazioni tecniche, sono dotati di un apposito locale per la preparazione del materiale didattico, mentre per gli spazi destinati all'educazione artistica è prevista la possibilità di organizzare esposizioni e mostre.

Lo spazio destinato all'educazione musicale viene progettato prevedendo l'eventuale integrazione con l'auditorium, in modo tale da consentire l'uso di un unico grande spazio, grazie a una tramezzatura mobile di separazione, da impiegare in occasione di spettacoli, audizioni e assemblee. Infine, lo spazio per le attività di comunicazione e informazione si configura come ambito di sintesi globale di tutte le attività della scuola: didattiche, associative, gestionali, parascolastiche.

Esso risulta caratterizzato da più ambienti integrati, quali la biblioteca, per le attività di ricerca e scambio dati, e l'auditorium polivalente per attività didattiche, spettacoli, assemblee, o semplicemente come luogo di conversazione.

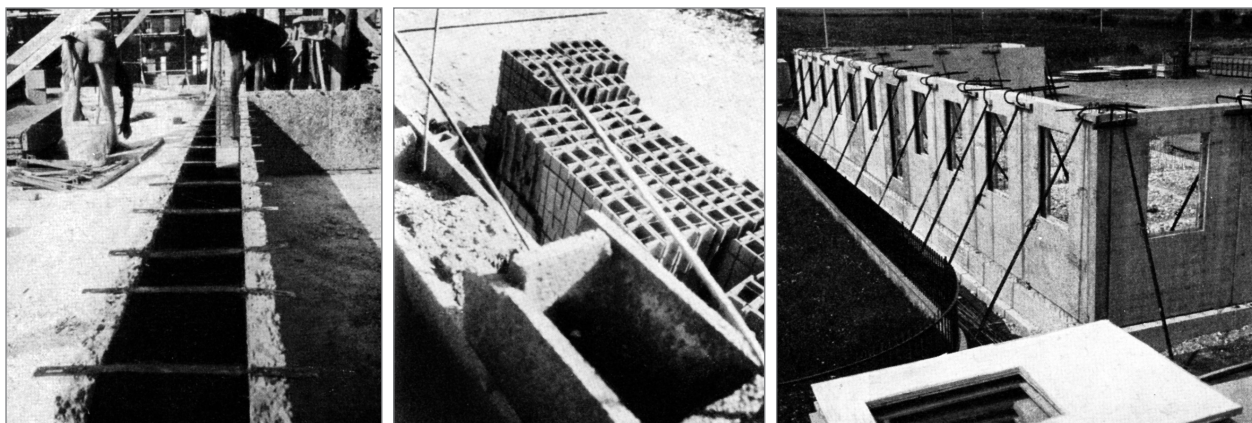
La realizzazione di questi spazi differenziati viene risolta grazie al ricorso alle tecniche di prefabbricazione dei singoli elementi costruttivi modulari e serializzati, da assemblare in opera in maniera rapida, facile ed economica, a costituire l'intero edificio [Fig. 24]: in questo principio risiede la vera e propria interpretazione del concetto di strutturazione degli spazi, derivante dalla *structūra* di matrice Vitruviana.

IV.2.2 EVOLUZIONE DEI CARATTERI TIPOLOGICI E COSTRUTTIVI

Al fine di analizzare in maniera più approfondita gli edifici scolastici realizzati nel territorio comunale tra gli anni 1960 e 1980, occorre ricostruire un quadro generale relativo alla nascita e allo sviluppo delle tecniche costruttive basate sull'impiego di elementi prefabbricati.

Nell'ambito dell'edilizia, a partire dagli anni Sessanta in avanti, si assiste a un progressivo sviluppo delle tecniche di prefabbricazione che, fin dalle prime sperimentazioni delle tecniche parzialmente prefabbricate, quali l'utilizzo di casseforme a perdere per la realizzazione di elementi verticali e orizzontali, lasciano intravedere grandi potenziali per la realizzazione rapida ed economica di edifici²⁶. Infatti, ogni singolo edificio realizzato è frutto di indagini, studi e miglioramenti che durante quegli anni vengono condotti ai fini di una migliore ottimizzazione di tempi e costi.

La prefabbricazione consente un'elevata produttività, grazie al riferimento a procedimenti di tipo industriale di elementi costruttivi da porsi in sito con operazioni prevalentemente di montaggio. Il grado di meccanizzazione di questi sistemi è tanto più elevato quanto maggiore è la quota della produzione meccanizzata rispetto al lavoro manuale. È essenziale dunque che ci si riferisca allo stato quasi definitivo dell'elemento, quali solai prefabbricati che comprendano già quasi tutti i componenti delle rifiniture, pannelli esterni già completi di rivestimenti interni ed esterni, pilastri provvisti di fori a intervalli regolari necessari per le installazioni. Inoltre, un altro elemento fondamentale da considerare fin dalla fase di progettazione consiste nella problematica di ingombro degli elementi costruiti, in relazione al trasporto dall'officina al cantiere e alla fase di montaggio.



[Fig. 25-27] Sistemi costruttivi basati sull'impiego di casseforme a perdere per pareti: (da sinistra) pannelli in legno-cemento, a costituire pareti dotate di proprietà isolanti intrinseche; blocchi cavi in calcestruzzo pesante o leggero, da riempire con getto in opera di calcestruzzo di completamento che, se realizzato con cls leggero miscelato con granuli di argilla espansa, contribuisce significativamente a incrementare le proprietà isolanti termiche e acustiche della parete; sistema di parete a doppia-lastra, costituito dall'accoppiamento di due lastre distanziate da un sistema di tralicci di irrigidimento, che fungono da cassaforma per il getto di calcestruzzo da eseguire in opera.

26 Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 693-758.

In questo paragrafo si vuole fornire un elenco esaustivo dell'evoluzione delle tecniche principali di prefabbricazione, senza pretendere di fornire un elenco completo delle maggiori ditte produttrici che, durante questa epoca, proliferano numerose e si sviluppano progressivamente. Si intende, quindi, delineare un quadro completo dei caratteri tipologici e costruttivi principali delle tecniche di prefabbricazione che, tanto nel settore dell'edilizia industriale quanto in quello dell'edilizia scolastica, si sviluppano grazie alla ricerca delle stesse istanze: risparmio nei tempi di realizzazione e quindi notevole risparmio di costo.

CASSEFORME A PERDERE

Procedendo con ordine, prima di giungere alla definizione dei caratteri tipologici e costruttive delle tecniche di prefabbricazione, occorre rilevare che un'altra possibile soluzione impiegata ai fini della riduzione dei costi è costituita dalle tecniche di perfezionamento dei sistemi tradizionali mediante l'impiego di casseforme a perdere.

Il principio di base, già applicato con le prime sperimentazioni di prefabbricazione di solai in laterizio, volto a perfezionare i procedimenti dell'edilizia tradizionale, nell'anno 1980 viene riproposto sotto varie forme, in particolare sotto la forma più generale della produzione di componenti, per lo più di piccole dimensioni, per la realizzazione di pareti portanti, solai, e altri elementi all'interno del processo produttivo dell'edificio.

Un'altra soluzione tecnologica volta a ridurre i costi di costruzione propone la realizzazione di getti in opera, effettuati all'interno di casseforme a perdere, da incorporare con getti di completamento. Questa soluzione, oltre a contribuire enormemente agli elevati costi della cassetta, che rimane inglobata all'interno della struttura, contribuisce all'accrescimento del potere isolante, termico e acustico, delle pareti portanti gettate in opera.

L'applicazione più immediata di questo principio impiegato per la realizzazione di elementi verticali consiste nell'impiego di *elementi-cassone*, cioè blocchi cavi in calcestruzzo (con eventuale inserimento di armatura), per costituire pilastri o pareti portanti sopperendo agli elevati oneri di realizzazione delle cassette [Fig. 25].

Una soluzione alternativa è data dall'applicazione di *pannelli in legno-cemento* come casseforme a perdere, ottenuti impastando cemento e fibre di legno, pressati, stagionati a caldo e sottoposti a opportuni trattamenti con processi chimici di protezione [Fig. 26].

O ancora, la realizzazione di pareti verticali può essere risolta mediante la realizzazione di *doppie-lastre da parete*, costituite dall'associazione di due lastre in calcestruzzo armato, ciascuna di spessore di 4 cm, distanziate da un sistema di tralicci, fino a costituire uno spessore complessivo di 20-40 cm da riempire con il getto di calcestruzzo, a costituire una parete portante dotata di elevata resistenza, inerzia e coibenza. Analogamente, lo stesso principio può essere applicato anche a

strutture orizzontali [Fig. 27].

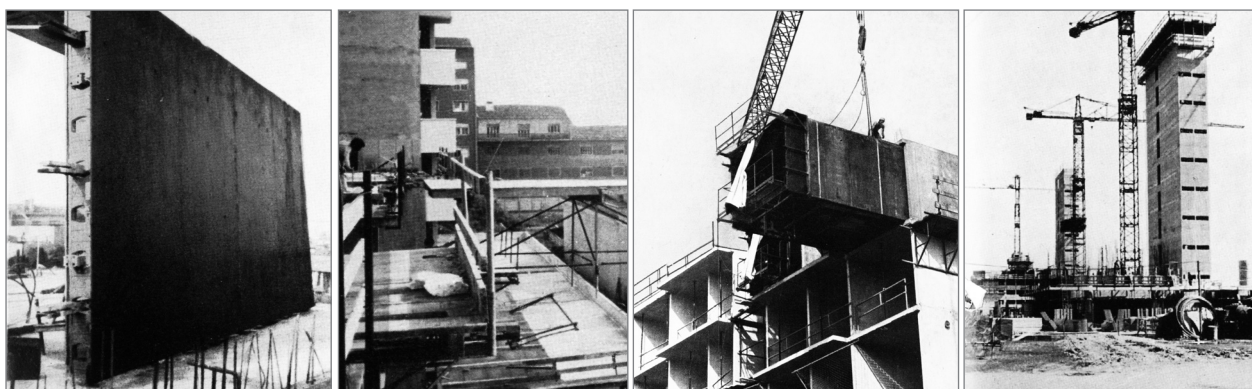
Infine, particolare attenzione meritano i solai *predalles*, che rappresentano un esempio particolarmente riuscito di componente prefabbricato per le applicazioni richieste: essi sono costituiti da un cassero a perdere, e cioè da una lastra sottile in c.a. irrigidita da tralicci in ferro, pertanto capace di autoportarsi su luci di entità elevata. Il loro peso ridotto non pone gravi problemi di trasporto e sollevamento in opera e, al contempo, il limitato spessore della lastra consente l'eventuale taglio e aggiustamento in seguito a possibili errori di misura.

GETTI IN OPERA INDUSTRIALIZZATI

Il principio base di risoluzione del problema degli elevati costi di cassetteria mediante la realizzazione di getti in opera all'interno di casseforme a perdere viene ulteriormente sviluppato grazie all'impiego di casseri mobili e fortemente razionalizzati, per consentire di eseguire getti in opera industrializzati all'interno di casseri facilmente riutilizzabili per altre lavorazioni di cantiere.

I sistemi *banches-tables*, validi soprattutto nell'edilizia residenziale, prevedono la realizzazione mediante getti in opera di *banches*, ossia di setti verticali in casseforme costituite da grandi pannelli in legno o metallo opportunamente irrigiditi. A getto indurito e disarmato, tra i setti verticali vengono disposte le *tables coffrantes*, ossia le tavole di contenimento, che consentono il getto degli orizzontamenti. Eventualmente, alle *tables* possono essere vantaggiosamente sostituite le *predalles* che costituiscono l'analogo elemento di cassetteria a perdere per gli orizzontamenti [Fig. 28, 29].

Questo procedimento realizza schemi strutturali e risultati simili a quelli conseguibili con i sistemi *a tunnel*, dai quali si differenzia per l'impiego di attrezzature notevolmente più semplici. Il



[Fig. 28-31] Sistemi costruttivi basati sulla realizzazione di getti in opera industrializzati: (da sinistra) posa in opera di *banche* metallica con passerella di servizio; posa in opera di *table* per la realizzazione del getto di solaio; disarmo e sfilamento di *cassaforma a tunnel*; costruzione di *casceforme rampanti* per il getto di tutte le pareti portanti degli edifici a torre realizzati nel quartiere di Casteldebole a Bologna.

sistema che impiega casseforme a tunnel consiste nella realizzazione del getto all'interno di cellule scatolari formate da elementi piani, che possono costituire unità complete mono o pluriambiente, mediante l'adozione di casseforme a tunnel, atte a consentire il getto contemporaneo di due pareti laterali e del soffitto della cellula scatolare. La soluzione a tunnel presenta una buona flessibilità per quelle tipologie edilizie che ammettono un'organizzazione strutturale trasversale. In questo senso, tale tecnica si presta ottimamente per l'edilizia residenziale, consentendo un'ottima produttività di cantiere, con una soglia minima di dimensione economica di 60-70 alloggi. Inoltre, dal punto di vista prestazionale energetico, grazie alle sue caratteristiche di elevata massa inerziale, il getto pieno offre buone proprietà in termini di isolamento termico e acustico. In genere, negli edifici costruiti con sistemi a tunnel, le chiusure esterne sono costituite da pannelli prefabbricati, spesso a piè d'opera, offrendo libertà di trattamento delle facciate, così come di posizionamento delle tramezzature interne [Fig. 30].

Un'altra soluzione progettuale consiste nella realizzazione di *sistemi a casseforme rampanti*. Il loro processo di impiego prevede che esse vengano assemblate a livello del suolo, a delineare il contorno delle pareti da realizzare, per poi salire progressivamente, una volta effettuato il getto, lungo tutto lo sviluppo in verticale dell'edificio, fino alla sua sommità. Una volta conclusa la realizzazione della struttura portante verticale del fabbricato, le casseforme vengono smontate per poter essere riutilizzate altrove. L'impianto, quindi, consta essenzialmente di un sistema di casseforme aventi funzione di contenimento del getto, opportunamente irrigidite e azionate da un sistema di martinetti idraulici per il loro sollevamento. Attorno alle casseforme scorrevoli sono collocate le piattaforme di lavoro a più livelli, ognuna delle quali consente la posa dei differenti elementi: la più alta consente la posa dell'armatura, quella intermedia serve per eseguire il getto del calcestruzzo ed eventuali operazioni accessorie come l'inserimento dei telai dei serramenti, mentre quella inferiore consente le operazioni di finitura della superficie di getto. Mentre questa tecnica consente di risolvere il problema della realizzazione delle pareti verticali interne ed esterne, rimane però aperto il problema della costruzione degli orizzontamenti che, però, all'interno dello stesso edificio, possono essere realizzati mediante il ricorso alle tecniche tradizionali o ai sistemi di prefabbricazione parziale [Fig. 31].

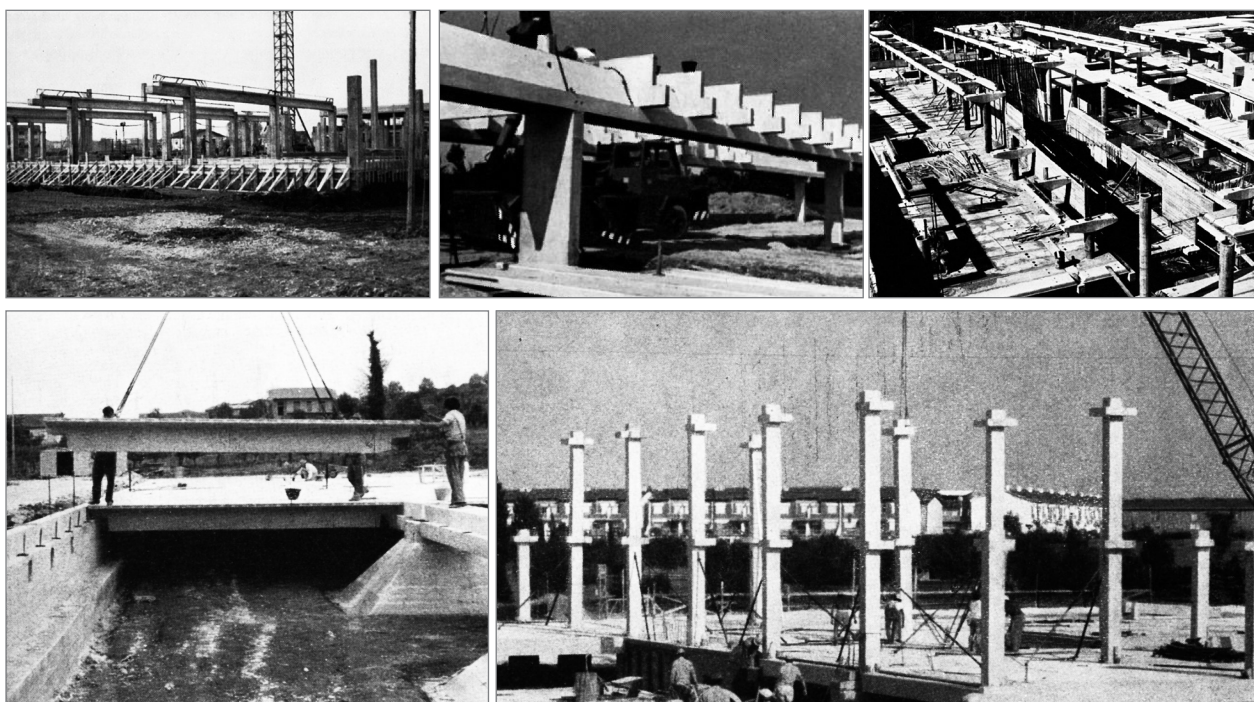
PREFABBRICAZIONE CON ELEMENTI LINEARI

Nell'ottica della massima ottimizzazione delle risorse economiche e temporali, cominciano a svilupparsi soluzioni propriamente prefabbricate, che prevedono la produzione in sede degli elementi portanti da trasportare e assemblare in cantiere. Il primo tipo di prefabbricazione integrale prevede la realizzazione degli elementi lineari a costituire lo scheletro portante di un fabbricato. La prefabbricazione con elementi lineari, infatti, si propone di riprodurre gli schemi statici delle

strutture di edilizia tradizionale, in cui gli elementi principali sono pilastri e travi (geometria monodimensionale o lineare), mentre piastre di solaio e pannelli di tamponamento (elementi a geometria bidimensionale) costituiscono i manufatti, portati dall'ossatura principale, a completamento della struttura dell'edificio.

La prefabbricazione lineare è di immediato e intuitivo impiego nell'edilizia industriale, in quanto, consentendo di separare le funzioni portanti da quelle di tramezzatura e partizione spaziale interna, offre la possibilità di raggiungere ampie maglie strutturali, con l'adozione di travi in c.a.p., ottenendo una elevata libertà e flessibilità per le disposizioni in pianta. Per l'edilizia residenziale invece, tale procedimento costruttivo presenta lo svantaggio di successivi onerosi interventi di completamento e finitura (getti di sutura, realizzazione di tramezzi, intonaci, pavimenti, impianti) da realizzarsi con tecniche di edilizia tradizionale, a differenza di quanto accade per la tecnica costruttiva basata sullo schema a pannelli portanti.

La prefabbricazione lineare riproduce gli schemi statici dell'edilizia tradizionale, basata sul sistema di travi e pilastri, a geometria lineare. Gli edifici realizzati richiedono, dunque, un maggior lavoro di montaggio dovuto al numero elevato di elementi componenti l'ossatura e i tamponamenti. Questa tecnica deve essere correttamente concepita per quanto concerne la scelta dello schema



[Fig. 32-34] (In alto, da sinistra) *Sistema Benini 1* adottato per la realizzazione dell'Istituto Tecnico per Geometria Vicenza; *Sistema Benini 2* impiegato per la costruzione della Scuola Materna progettata dall'Arch. Pellegrin; *Sistema Benini 3* adottato per la realizzazione del Liceo Scientifico di Pisa.

[Fig. 35,36] (In basso, da sinistra) *Sistema "standard" di C.M.C.* impiegato per la realizzazione della Scuola Media di Serravezza e della Scuola Elementare di Rimini.

strutturale, con particolare riguardo per i notevoli problemi che sorgono nella realizzazione delle unioni tra i singoli manufatti prefabbricati, soprattutto per quanto riguarda il trasferimento degli sforzi iperstatici.

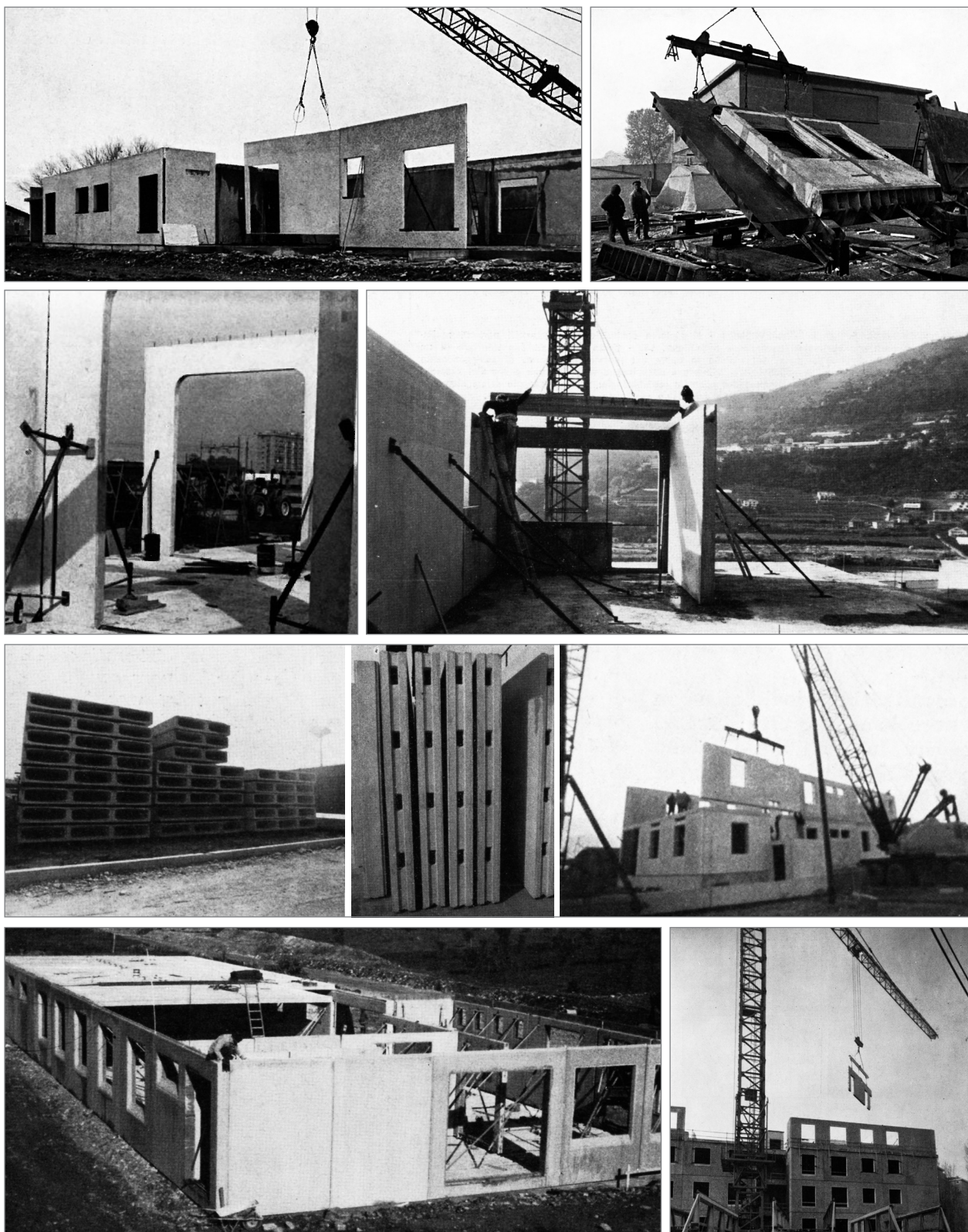
Vengono riportati di seguito alcuni esempi di soluzioni prefabbricate lineari adottate da alcune delle principali ditte produttrici; questo elenco verrà completato dalle ditte che si dedicano specificamente alla costruzione delle Scuole Media di Bologna, elencate nel paragrafo successivo.

- La *Benini* realizza tre diversi sistemi di costruzione prefabbricata:
 1. il Sistema 1 utilizza pilastri prefabbricati cavi, sui cui vengono posizionate le parti inferiori delle travi: mentre queste ultime sono prefabbricate, le parti superiori vengono gettate in opera successivamente, dopo aver inserito i pannelli di solaio [Fig. 32];
 2. il Sistema 2 utilizza pochi elementi di grandi dimensioni, per svincolarsi dalla suddivisione degli spazi interni, costituita da pilastri sagomati dotati di mensole, sulle quali vengono appoggiate le travi a V rovescia, sulle quali a sua volta vengono posizionati gli elementi di appoggio dei solai [Fig. 33];
 3. il Sistema 3 prevede travi raddoppiate poste simmetricamente rispetto al pilastro sui cui poggiano, che è cavo e appositamente sagomato con mensole di notevoli dimensioni al fine di consentire il raggiungimento di luci maggiori [Fig. 34].
- La *C.M.C. - Cooperativa Muratori e Cementisti* di Ravenna realizza in stabilimento tutti i componenti dell'edificio scolastico, secondo un sistema standard di manufatti interscambiabili e variabili per dimensioni, in base alla progettazione architettonica. I pannelli del tipo sandwich, i pilastri a capitello, le travi e i solai nervati si assemblano su una maglia strutturale variabile da (3,60x3,60) m a (9,60x9,60) m, con ampia libertà distributiva. [Fig. 35-36]
- La *Facep* attua vasti complessi edilizi componendo pilastri pluripiano con capitello, solai nervati, travi a sezione rettangolare sagomate con aletta per l'appoggio dei solai e, soltanto in corrispondenza del perimetro, per l'aggancio dei pannelli frangisole per la schermatura della radiazione solare.
- La *F.lli Lombardi S.p.A.* prevede una struttura portante costituita da pilastri circolari cavi e travi a U, completate in opera da getti di calcestruzzo, tamponata esternamente da fasce orizzontali di pannelli modulati in altezza. In particolare, propone il Sistema I.M.S., costituito da pilastri monolitici fino all'altezza di tre o quattro piani, e da solai a piastra bidirezionali con intradosso nervato o piano. La solidarietà tra i componenti strutturali è ottenuta con cavi post-tesi. La variabilità della maglia strutturale da quadrata fino a rettangolare permette molteplici soluzioni per l'edilizia abitativa. I sistemi proposti per l'edilizia scolastica LP 21, 22, 24, invece, prevedono l'impiego di questi elementi prefabbricati per realizzare una maglia modulare (7,20x7,20) m, abbinato all'impiego di pannelli mono o multistrato, a scansione orizzontale, verticale o reticolare, per la realizzazione delle tamponature esterne [Fig. 37].



[Fig. 37-46] (Dall'alto, da sinistra) Sistema I.M.S. dei F.lli Lombardi S.p.A., Sistema Larco, Sistema di Leonori, Sistema di MBM - Impresa Generale Costruzioni Meregaglia; Sistema di Prefabbricati Soncini; Sistema di R.D.B.; impiegato per una Scuola Elementare a Piacenza; Sistema di SACIE impiegato per la Scuola Materna a Milano San Felice; Sistema di Technopref; Sistema di S.I.C.E.P.S; Sistema di Valdadige impiegato per una Scuola Media a Udine.

- Il *Sistema Larco* è costituito fundamentalmente da un sistema di pilastri prefabbricati, tra i quali vengono inseriti i pannelli di tamponamento e di partizione, anch'essi prefabbricati e assemblati in opera a secco [Fig. 38].
- La *Leonori* realizza edifici scolastici dotati di spazi interni aperti e dinamici, in linea con la nuova concezione di "scuola moderna", realizzati mediante l'impiego di strutture costituite da elementi prefabbricati assemblabili tra loro in modo flessibile, mediante un sistema di incastro e sigillatura con malta [Fig. 39].
- La *MBM – Impresa Generale Costruzioni Meregaglia* prevede una struttura su maglia (3,60x7,20) m, in zona sismica, che permette di ottenere una grande flessibilità nella distribuzione interna degli edifici scolastici [Fig. 40].
- La soluzione *Prefabbricati Soncini* prevede pilastri ad altezza di piano, caratterizzati da una particolare conformazione della parte terminale, per consentire l'appoggio delle travi e l'alloggiamento dei ferri fuoriuscenti dal pilastro superiore. Ogni pilastro è dotato di un'asola a cui è fissato un tenditore per mantenerlo in sede in fase di montaggio, e di tre boccole filettate, con viti di regolazione, per la messa a piombo. Dopo il posizionamento delle travi e l'inserimento dei ferri, si opera il getto di completamento per rendere solidali i componenti [Fig. 41].
- La *R.D.B.* prevede una struttura portante intelaiata composta da pilastri pluripiano, travi e pannelli di solaio, assemblati tra loro grazie alla realizzazione di getti collaboranti, completata da paramenti esterni realizzati con pannelli in calcestruzzo [Fig. 42].
- La *SACIE* propone un sistema a maglia quadrata e modulare, in cui tutti i vari componenti sono legati a secco, mediante un vincolo di semplice appoggio [Fig. 43].
- La *S.I.C.E.P.S.* propone un ancoraggio dei pilastri alla fondazione con chiamate emergenti del tipo a staffone in acciaio, ripetute a ogni piano in corrispondenza degli incastri di travi, e inserite nella parte superiore cava del pilastro sottostante. La chiusura perimetrale è realizzata con travi-parete fissate ai pilastri negli appositi alloggi, pannelli-parete e copri-pilastri. La maglia strutturale, variabile da (7,20x7,20) m a (7,20x14,40) m permette valide e flessibili soluzioni, specialmente per l'edilizia scolastica [Fig. 44].
- Il sistema costruttivo della *Technopref* utilizza pilastri dotati ciascuno di due vani alla sommità per l'alloggiamento dei ferri dell'elemento superiore, riempiti poi dal getto integrativo, con un profilato tubolare che, in fase di montaggio, garantisce il posizionamento del pilastro e il collegamento provvisorio. Le travi perimetrali fungono anche da cassero [Fig. 45].
- La *Valdadige* utilizza pilastri monolitici che, a ogni orizzontamento, presentano delle mensole anulari, sulle quali si appoggiano le travi, connesse mediante appositi dispositivi meccanici di collegamento, completati definitivamente da un getto. Sulle travi poggia il solaio, costituito da un elemento a P, oppure da elementi in c.a.p. per le grandi luci. In particolare, per l'edilizia scolastica, la ditta adotta un sistema a pilastri con mensole monolitici fino a tre



[Fig. 47-53] (Dall'alto, da sinistra) Sistema di Belloni; Sistema di Borini; Sistema di Cogefar impiegato per realizzare la Scuola Media a San Giuliano Milanese; Sistema di I.GE.CO. Pontello Prefabbricati; Sistema di SACEP; Sistema di Vibrocemento Perugia; Sistema di MBM - Impresa Generale Costruzioni Meregaglia.

piani, e travi a L o a T rovescio. Le mensole sono dotate di appositi dispositivi meccanici per il collegamento con le travi, completato in definitiva dal getto integrativo. Il solaio è costituito da elemento a π in c.a. o c.a.p., posti a un interasse di 2,40 m [Fig. 46].

PREFABBRICAZIONE A PANNELLI PORTANTI

Una ulteriore evoluzione delle tecniche di prefabbricazione consiste nella realizzazione di *grandi pannelli prefabbricati*, impiegati principalmente per l'edilizia abitativa.

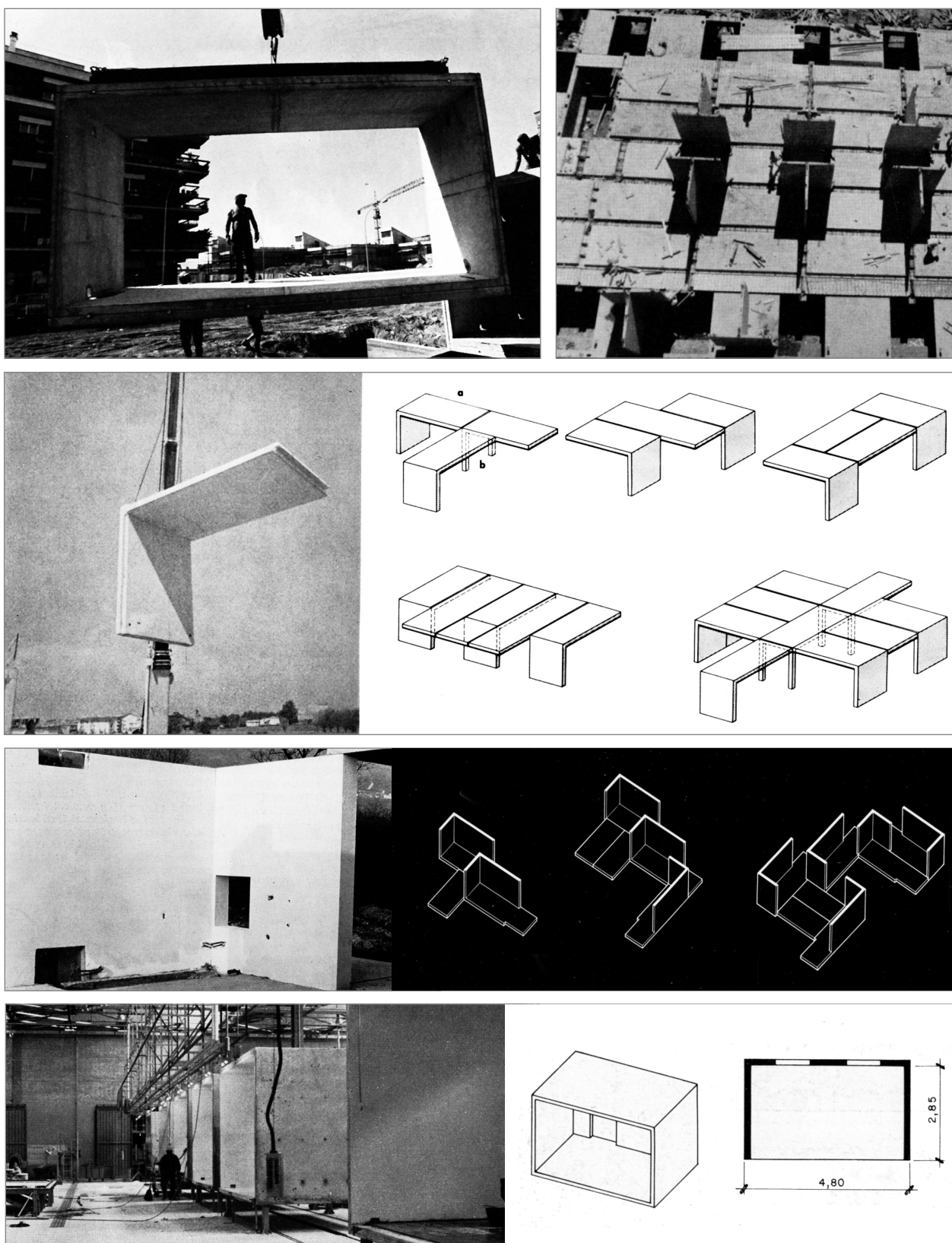
Gli schemi costruttivi adottati da questo tipo di soluzione tecnica si basano principalmente sull'utilizzo di pannelli di parete prefabbricati ad altezza di piano, solitamente con funzione portante e pannelli di solaio prefabbricati, di luci pari alle dimensioni dei locali, compresi del massimo grado di finitura per quanto concerne rivestimenti, intonaci, integrazione di impianti e condutture, inserimento di telai per serramenti.

L'edificio prefabbricato viene realizzato in seguito al montaggio in opera di questi manufatti, limitando al massimo i getti in opera in corrispondenza dei giunti fra i pannelli accostati. Per quanto concerne la tecnologia di produzione degli elementi da assemblare in sito, i pannelli possono essere prodotti in officine di prefabbricazione opportunamente attrezzate, poste anche a notevole distanza dai cantieri di costruzione, ma anche a piè d'opera ("prefabbricazione foranea") con l'impiego di più modeste attrezzature, raggiungendo un compromesso tra la costruzione tradizionale e le tecniche industrializzate.

La tecnica di prefabbricazione mediante grandi pannelli viene proposta nel secondo dopoguerra per far fronte alla grande domanda di case, essenzialmente in Europa Occidentale, in Francia e nei Paesi Scandinavi. Analogamente, si sviluppa anche in Europa Orientale grazie alle possibilità offerte dalle pianificazioni statali dell'edilizia. In Italia, la prefabbricazione a grandi pannelli, introdotta negli anni Sessanta, non riesce comunque ad affermarsi in forma convincente per raggiungere una sua specifica individualità, probabilmente a causa di una molteplicità di fattori, tra cui la bassa economicità dei medi e piccoli interventi ai quali è confinata, a causa dell'assenza di una politica di piano nell'edilizia residenziale.

Vengono di seguito riportati alcuni esempi di soluzioni progettuali adottate da alcune note ditte produttrici.

- La *Belloni* impiega un sistema composto da pannelli portanti prefabbricati per pareti esterne e solai, collegati tra loro mediante giunti verticali e orizzontali, gettati in opera [Fig. 47].
- La *Borini* prevede un sistema costituito da pannelli portanti esterni realizzati a piè d'opera e da una struttura interna intelaiata, composta da elementi verticali e orizzontali collegati tra loro da cordoli, a costituire una struttura portante tridimensionale [Fig. 48].



[Fig. 54-58] (Dall'alto, da sinistra) Sistema di *Grandi Lavori*; *Sistema Praha*; *Sistema ELLE* di Studio DLC; Sistema di *I.GE.CO. Pontello Prefabbricati*; *Sistema Triedro*; *Sistema Zanussi Farsura*.

- La *Cogefar* utilizza un sistema leggermente diverso dai precedenti, in quanto realizza pareti a portale in cemento prefabbricato, collegate ai solai attraverso getti di calcestruzzo di completamento, che portano alla realizzazione di edifici compatti e raccolti verso le aree più centrali [Fig. 49].
- La *I.GE.CO. Pontello Prefabbricati* prevede la realizzazione di grandi pannelli per i setti portanti multitubolari, per i solai e per le chiusure interne ed esterne [Fig. 50].
- La *Sacep* utilizza dei pannelli-parete costituiti da due solette sottili esterne in c.a., collegate tra loro da nervature modulate su 60 cm, il cui spazio interstiziale viene riempito da materiale termoacustico. Il collegamento tra i pannelli e i solai (di larghezza modulare 2,40 m, assemblabili fino a raggiungere una larghezza totale di 8,40 m) avviene tramite un cordolo in c.a. gettato in opera [Fig. 51].
- La *Vibroemento Perugia* prevede pannelli verticali con duplice funzione portante e di tamponamento, assemblati a pannelli orizzontali precompressi e multiforo, collegati tra loro mediante perni e sistemi di ancoraggio puntuale meccanico a secco [Fig. 52].
- La *MBM - Impresa Generale Costruzioni Mereaglia* impiega pannelli prefabbricati collegati tra loro in opera mediante differenti sistemi collegamento, variabili in funzione delle esigenze statiche. I nodi di connessione possono anche avvenire tramite getto di completamento, come nel caso dell'assemblaggio tra i pannelli *predalles* per la realizzazione dei solai [Fig. 53].

SISTEMI TRIDIMENSIONALI

La forma più avanzata di prefabbricazione è rappresentata dai *sistemi tridimensionali*, basati sull'aggregazione di elementi piani atti a costituire elementi più complessi, altamente rigidi e autoportanti. Si possono trovare esempi di sistemi tridimensionali inseriti sia all'interno di schemi strutturali di prefabbricazione lineare o a pannelli portanti, sia nell'edilizia tradizionale, sotto forma di blocchi ascensore o blocchi attrezzati per cucine e bagni, con specifica funzione di controvento.

Di seguito vengono riportati alcuni esempi di sistemi prefabbricati tridimensionali adottati da alcune ditte produttrici.

- La *Grandi Lavori* utilizza cellule spaziali interamente in cemento armato, dotate di nervature ai bordi, prodotte all'interno in officine poste in posizione baricentrica rispetto ai cantieri, al fine di ottimizzare il trasporto tramite camion. L'assemblaggio in cantiere delle cellule risulta particolarmente rapido per il minor numero di pezzi utilizzati rispetto ad altri sistemi. [Fig. 54]
- Il *Sistema Praha*, che rappresenta la soluzione prefabbricata tridimensionale più semplice,



[Fig. 59-63] Tipologie di coperture per edifici industriali: (dall'alto, da sinistra) copertura piana con travi principali a cassone, atte ad assorbire notevoli sforzi di torsione, offrendo un ampio spazio interno libero per le canalizzazioni, realizzate da *Codelfa*; copertura piana con travi principali a V, atte a garantire una rigidità trasversale maggiore delle travi a I, realizzate da *Costruzioni Generali Prefabbricate*; copertura di edificio industriale con elementi Silberkuhl disposti a shed, progettati da *Brenta Precompressi*; copertura a shed con travi a doppia pendenza di grande luce, realizzate in due conci solidarizzati in opera con precompressione, progettata da *Studio D.L.C.*; copertura a doppia pendenza con tegoli a doppio T che permettono di superare i problemi di freccia posti dalle travi a U, consentendo di realizzare capriate di 10-12 m, progettati da *Prefabbricati Peruzzi*.

prevede una struttura costituita da pannelli verticali piegati a diedro (a L o a T), collegati alle piastre di solaio mediante giunti gettati in opera. In sostanza, si tratta di una evoluzione del sistema prefabbricato a pannelli portanti, alle cui pareti verticali viene applicato il concetto di diedro [Fig. 55].

- Lo *Studio DLC* propone il *Sistema ELLE* che appartiene ai sistemi “a cellule aperte”, costituito dall’assemblaggio di due, tre o quattro pannelli piani, collegati tra loro lungo uno dei loro spigoli in comune. Mediante questo sistema si ottengono schemi scatolari per sovrapposizione e accostamento di pareti, evitando il raddoppiamento delle pareti, inevitabile invece per i sistemi “a cellula chiusa”. In particolare, il sistema ELLE prevede l’impiego di elementi prefabbricati sotto forma di diedri in cui, naturalmente, il pannello verticale costituisce la parete e il pannello orizzontale costituisce il solaio [Fig. 56].
- I *Sistemi Triedro*, sviluppati a partire dal progetto dell’Arch. Colma, sono basati su elementi costituiti dall’assemblaggio di tre pannelli planari (triedri), avvenuto in officina o in cantiere: questa configurazione consente di ottenere un elemento intrinsecamente stabile e facilmente trasportabile, a differenza dei diedri che necessitano di un supporto iniziale portante e controventante [Fig. 57].
- Il *Sistema Zanussi Farsura* prevede una soluzione più complessa, che porta il sistema di prefabbricazione tridimensionale verso la prefabbricazione della scatola costituente la stanza completa. Naturalmente, l’accostamento di queste scatole, mediante perni di centraggio iniettati con resine epossidiche, porta al raddoppio degli spessori di solai e pareti, molto favorevole dal punto di vista dell’isolamento termoacustico. In corrispondenza delle superfici di appoggio tra i moduli assemblati e delle strutture di fondazione, vengono interposte piastre di neoprene al fine di garantire sia l’isolamento acustico, sia il funzionamento statico indipendente dei solai separati [Fig. 58].

PREFABBRICAZIONE DI EDIFICI INDUSTRIALI

Lo stadio finale dell’evoluzione costruttiva delle tecniche di prefabbricazione per l’edilizia consiste nella realizzazione di intere celle prefabbricate ed edifici industriali. Si tratta del settore in cui si verifica il successo più indiscusso delle tecniche di prefabbricazione.

Per l’edilizia industriale, a differenza di quanto si verifichi per l’edilizia residenziale e scolastica, è infatti possibile formulare un programma di prefabbricazione basato su una produzione di elevata serie, articolata su un numero limitato di tipi di elementi, da posare in opera agevolmente, mediante semplici operazioni di montaggio. La prefabbricazione industriale prevede di norma la fornitura di modelli di edifici, ossia stabilimenti industriali, a tipologia chiusa, completi di ogni accessorio, che pertanto non necessitano dell’intervento di un progettista esterno.

I vantaggi conseguenti alla possibilità di prefabbricare intere celle, e dunque di diminuire drasticamente tempi e costi, devono far fronte però ai limiti legati all'impossibilità di effettuare scelte progettuali più flessibili e aderenti alle esigenze dei singoli casi.

La possibilità di progettare singole componenti da assemblare successivamente consente, infatti, al prefabbricatore di progettare con maggiore accuratezza e qualificazione della produzione dei singoli manufatti, offrendo un'ampia gamma di soluzioni progettuali per tutti gli elementi costruttivi costituenti la fabbrica.

I sistemi di prefabbricazione in questo settore prevedono la prefabbricazione centralizzata in apposite officine di tutti gli elementi che compongono l'edificio, principalmente le travi, le lastre di copertura, i pilastri e le lastre di parete. Le travi vengono di norma realizzate in c.a.p. a fili aderenti fino a luci di 25-30 m (eccezionalmente fino a 45 m), con sezioni a doppio T, a cassone [Fig. 59], a V [Fig. 60], a Ω , a π , tali da realizzare coperture piane [Fig. 61], a semplice o a doppia pendenza [Fig. 62, 63], combinate a lastre di copertura o tegoli con sezioni a elevata rigidità precompressi, atti a superare luci di 10-12 m (eccezionalmente fino a 24 m). Anche le pareti di tamponamento esterne vengono prefabbricate, preferibilmente con disposizione in opera a pannelli verticali, oppure orizzontali.

IV.2.3 PREFABBRICAZIONE CON ELEMENTI LINEARI PER L'EDILIZIA SCOLASTICA

Gli edifici scolastici analizzati in questa sede, diffusi nel territorio comunale di Bologna, così come in tutto il territorio italiano, sono realizzati mediante l'impiego delle tecniche di prefabbricazione con elementi lineari. Pertanto, si vuole riportare una sintesi delle principali ditte produttrici di elementi prefabbricati, volta a descrivere i principali sistemi proposti per la realizzazione di edifici scolastici fra gli anni Sessanta e Ottanta.

Si riportano di seguito alcuni esempi di soluzioni presenti sul mercato italiano a partire dagli anni Sessanta, alcune delle quali vengono adottate nel progetto di realizzazione di alcune Scuole Medie prefabbricate del Comune di Bologna²⁷:

- Il *CPCPLT - Consorzio Provinciale delle Cooperative di Produzione Lavoro e Trasporti*²⁸ propone varie tecniche costruttive, tra cui la S3, maggiormente usata per l'edilizia scolastica, costituita da un sistema di elementi in cemento armato prefabbricati [Fig. 64].

Il sistema S3 prevede una maglia strutturale ben definita (7,60x6,50) m, dedotta dalla superficie richiesta per ogni aula (49 m²) e dalla necessità di avere profondità di aula non molto superiore ai 6 m. Una volta assemblata la struttura, le squadre delle opere di finitura provvedono al montaggio delle tramezzature semimobili (quattro lastre di cartongesso coibentato, su telai di profilati in acciaio) e degli impianti elettrico e termico, lasciati a vista.

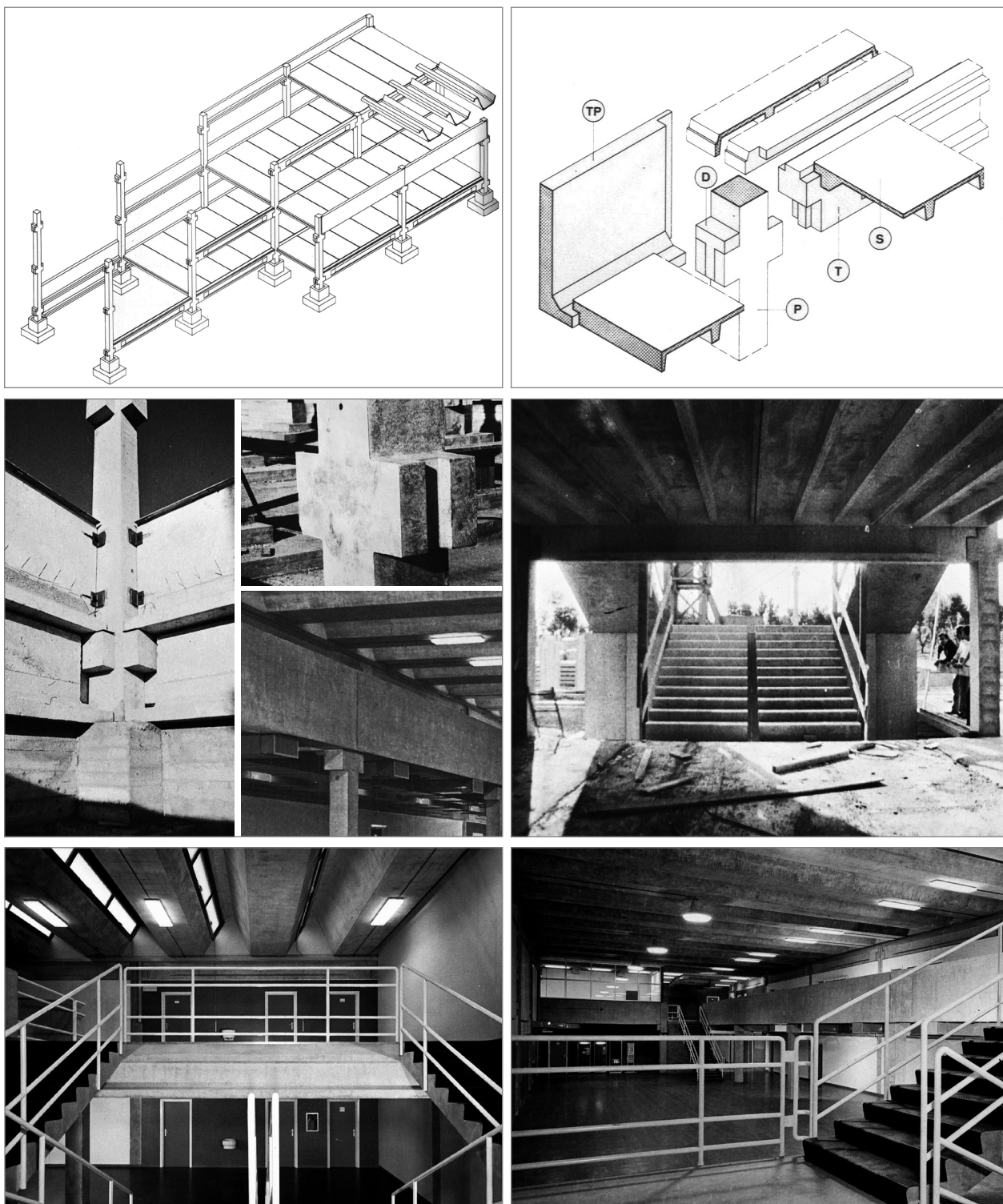
La peculiarità del sistema consiste nella possibilità di ricavare tutti gli elementi costruttivi necessari per la realizzazione dell'intero fabbricato, utilizzando soltanto cinque casseforme per la realizzazione dei componenti base, e servendosi dell'ausilio di semplici negativi o sponde²⁹ [Fig. 65]. Gli elementi che compongono il sistema S3 ad elementi prefabbricati, studiato per l'edilizia scolastica mono e pluriplano, sono infatti i seguenti:

1. pilastro (P) a sezione costante, che può essere continuo fino a due piani di altezza, con la possibilità di portare tre ordini di mensole (connessione mediante dado (D) [Fig. 66];
2. trave a doppio T (T) di unica dimensione standard, con testate sagomate per facilitare il posizionamento sulle mensole, le quali sono in spessore di trave [Fig. 67];

²⁷ Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 693-758.

²⁸ Durante gli anni Sessanta, il responsabile del CPCPLT è Ettore Masi, che dispone di diversi professionisti quali architetti, urbanisti e ingegneri: questo modello organizzativo permette di redigere progetti in modo integrato, ma anche di dialogare con l'Ufficio Tecnico del Comune di Bologna in base alle scelte urbanistiche. Negli anni 1960-70 il Consorzio CPCPLT realizza innumerevoli edifici con la tecnica della prefabbricazione, e verso la metà degli anni Settanta stipula con l'Amministrazione provinciale di Bologna un rapporto di "convenzione – concessione" per un programma di edilizia scolastica media e superiore e per progettazione di un modello di istituto tecnico di dimensioni ottimali. Nella seconda metà degli anni Settanta, il Consiglio di Amministrazione del Consorzio Provinciale delle Cooperative di Produzione, Lavoro e Trasporti di Bologna vota la fusione con i Consorzi di Ferrara e Modena, fino ad associare più di 100 cooperative: l'associazione assume il nome di Consorzio Cooperative Costruzioni (CCC).

²⁹ CPCPLT - Consorzio Provinciale delle Cooperative di Produzione Lavoro e Trasporti (Ufficio Progetti – Centro Studi), *Edilizia scolastica prefabbricata. Sistema S3*, Modena 1977.



[Fig. 64-69] Sistema prefabbricato S3, brevettato da CPCPLT - Consorzio Provinciale delle Cooperative di Produzione Lavoro e Trasporti: (dall'alto, da sinistra) assonometria del sistema di montaggio; schema assonometrico degli elementi costruttivi da assemblare a secco; dettaglio della trave durante la fase di montaggio; dettagli costruttivi dell'appoggio trave-pilastro; vista dello spazio distributivo e degli elementi di collegamento verticale predisposti per una scuola; vista dell'interno di una scuola. Il Sistema S3 è stato impiegato per realizzare numerose scuole nei pressi di Roma e di Bologna, tra cui la Scuola Media superiore di San Lazzaro di Savena (Bologna).

3. trave parapetto (TP) di dimensioni variabili, utilizzabile sia con funzione strutturale sia di tamponamento;
4. piastra di solaio (S) con nervature perimetrali e longitudinali (dimensioni della piastra trasversale: fisse, pari a $1/3$ della luce della trave; tre possibili dimensioni standard della piastra longitudinale: $(10 \times 6M + 4M) / (6 \times 6M + 4M) / (4 \times 6M + 4M)$ con $M=0,10$ m);
5. rampa scale (RS) [Fig. 68, 69];
6. elemento tridimensionale a T rovesciato, con funzioni di muro di sostegno.

Le dimensioni dei componenti sono determinate dal reticolo modulare adottato di $(7,20+0,40) \times (6,00+0,40)$ m, in cui i $0,40$ m corrispondono alla dimensione teorica dell'ingombro della sezione del pilastro e i $7,20/6,00$ m corrispondono a misure multiple di $6M$ e prossime alle dimensioni dell'aula standard (49 m^2).

Gli elementi sono caratterizzati da alcune innovative proprietà del processo di produzione, trasporto, montaggio: possono essere prodotti in stabilimento o a piè d'opera; vengono prodotti su banchi vibranti con maturazione accelerata; presentano dimensioni che non necessitano di mezzi speciali per il trasporto; hanno un peso medio di 3 t (con un massimo di 5 t) e pertanto non richiedono mezzi straordinari di sollevamento; una volta posati presentano stabilità, garantendo così una elevata velocità di montaggio; vengono montati a secco e l'appoggio di solai e travi viene realizzato mediante cuscinetto in neoprene.

La richiesta di tecnologia da parte delle Cooperative associate, la semplicità delle dotazioni di attrezzature occorrenti, la possibilità di produrre i pezzi in cantiere, la semplicità di montaggio senza l'ausilio di puntellature provvisorie, e soprattutto l'attività di progettazione e assistenza al cantiere svolta dal Consorzio, tra il 1974 e 1981, hanno permesso al sistema S3 uno sviluppo tra le Cooperative superiore alle previsioni³⁰.

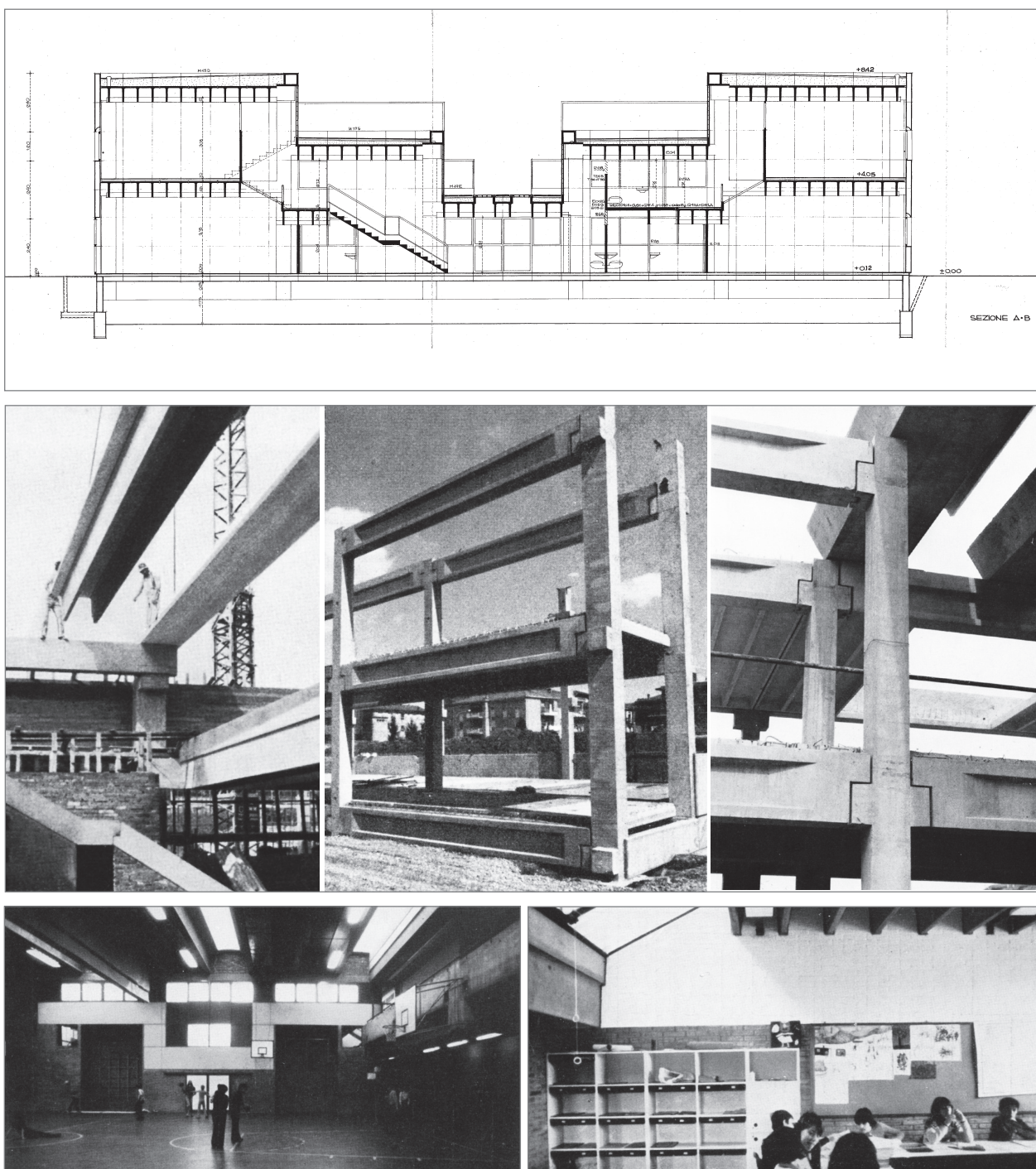
- La *Edilter* adotta un sistema di componenti costituito da pilastri pluripiano dotati di mensole, trave a doppio T con testate sagomate per il loro posizionamento sulle mensole, le quali sono in spessore con la trave, e piastre di solaio con nervature perimetrali e longitudinali.

Inoltre, sono previsti ulteriori componenti per la realizzazione della struttura portante, quali travi-parapetto e relativo dado di appoggio sul capitello [Fig. 69-71].

In particolare, mediante questo sistema prefabbricato, la *Edilter* ha contribuito alla realizzazione delle Scuole Medie del territorio bolognese, costruendo due Istituti Comprensivi a Bologna (I.C. n.14 "Volta" e I.C. n.1 "Dozza"), oltre che due scuole nella provincia di Bologna (Scuola Media di Castelmaggiore e Scuola Elementare di Casteldebole) [Fig. 72, 73].

- La *RDB* di Piacenza propone pilastri monolitici dotati di mensola, poste in posizione intermedia e in sommità, per l'appoggio delle travi portanti [Fig. 74]. Le travi hanno sezione

³⁰ Masi E., Guidotti A., *1960-1980 Progetti per le cooperative*, in "Parametro" - Lavorare in architettura: per le cooperative a Bologna 1960-1980, n.125, Aprile 1984, Faenza Editrice, Faenza 1984, p. 26.



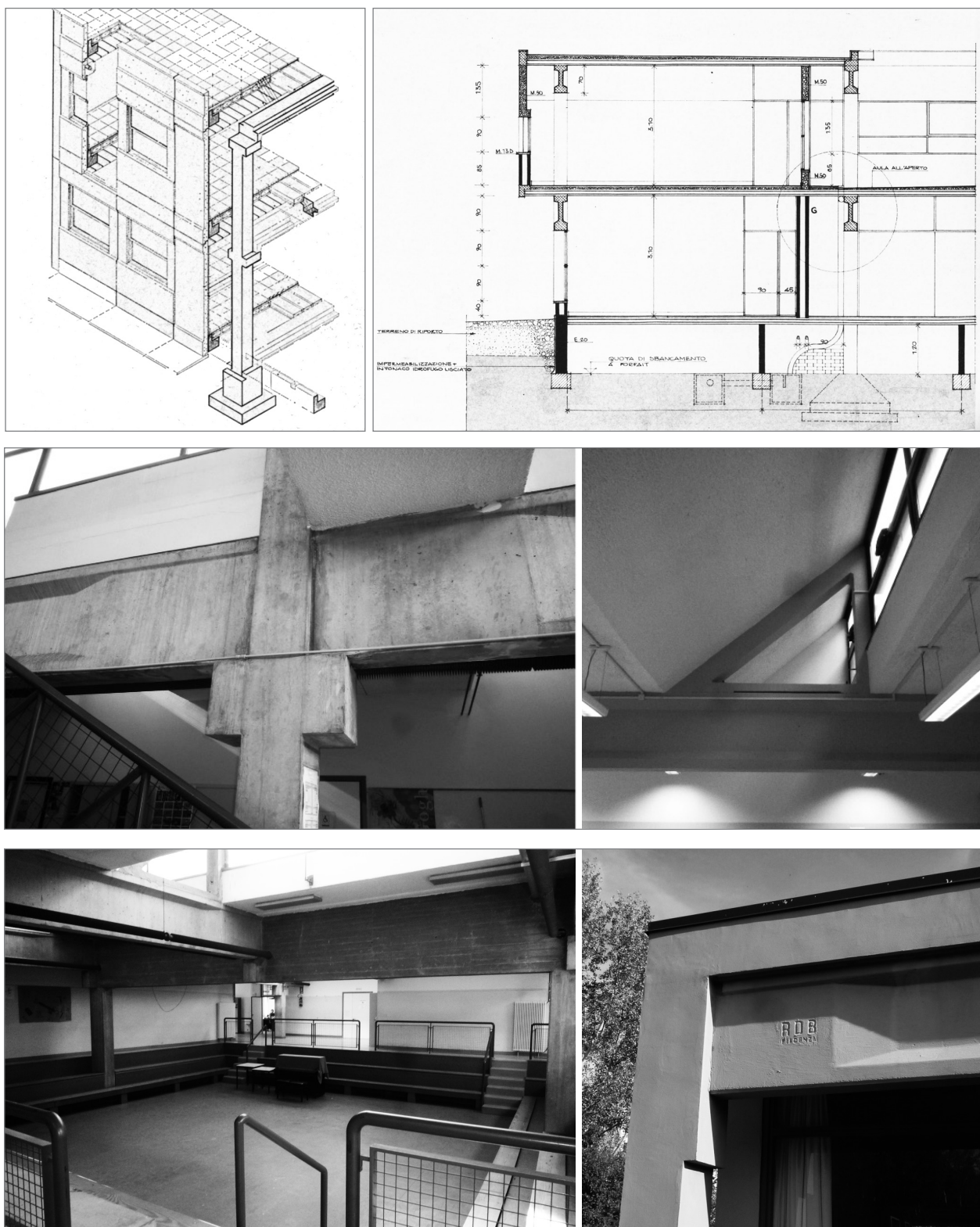
[Fig. 70-73] Sistema prefabbricato standard brevettato da **EDILTER**, impiegato per realizzare l'Istituto Comprensivo "Dozza" a Bologna (Quartiere Reno): (dall'alto, da sinistra) sezione longitudinale della Scuola Media, il cui progetto architettonico è stato adottato anche per realizzare altre quattro I.C. in altri quartieri di Bologna (I.C. n.9 "Guercino", I.C. n.10 "Besta", I.C. n.14 "Volta", I.C. n.15 "Zappa"); dettagli costruttivi degli elementi prefabbricati durante le fasi di cantiere di costruzione, tra cui il posizionamento dei tegoli di copertura, delle travi e delle piastre di solaio poggianti sui pilastri dotati di mensole; vista interna della palestra caratterizzata da una copertura piana con tegoli a doppio T per il raggiungimento di grandi luci; vista interna di un'aula per lo svolgimento delle attività formative di lezione frontale. Oltre che per i cinque I.C. "Volta e Dozza" di Bologna, il Sistema EDILTER è stato impiegato anche per realizzare la Scuola Elementare di Casteldebole (Bologna) e la Scuola Media di Castelmaggiore (Bologna).

rettangolare e sono dotate di alette laterali, sulle quali appoggiano pannelli precompressi a nervature rinforzate: la trave viene fissata mediante cunei lignei che vengono rimossi dopo il consolidamento dei getti integrativi delle strutture secondarie. La dimensione effettiva dell'appoggio nella direzione della trave può differire dalla dimensione teorica in misura non superiore al 10% di quest'ultima. Il paramento esterno, infine, è costituito da pannelli prefabbricati di argilla espansa, con rivestimento esterno in calcestruzzo di cemento bianco e marmo botticino a vista.

In particolare, la RDB (facente parte del Consorzio Cooperative Costruzioni) contribuisce alla realizzazione delle scuole secondarie di primo grado di Bologna, costruendo tre Istituti Comprensivi, realizzati adottando il medesimo progetto: I.C. n.12 "Farini" [Fig. 75], I.C. n.7 "Jacopo della Quercia" [Fig. 76], I. C. "Pepoli" [Fig. 77].

Queste scuole sono interamente prefabbricate, sia negli elementi costituenti la struttura portante, sia nei pannelli di tamponamento: tutti gli elementi arrivano in cantiere già dotati di fori e ganci per l'ancoraggio dei tiranti di sollevamento e il montaggio sicuro durante il processo di costruzione di assemblaggio.

La fase di montaggio degli elementi, eseguita in tempi brevi, viene eseguita mediante l'utilizzo di montatori: l'operaio accede alla sommità del pilastro mentre, con appositi mezzi di sollevamento dei carichi, la trave viene posizionata e portata a livello, per poi essere disimpegnata dalle funi di ancoraggio. Il montaggio viene eseguito interamente a secco, prevedendo la realizzazione di piccoli getti soltanto in caso di sigillatura, previa posa di eventuali armature metalliche di sussidio, non previste da progetto.



[Fig. 74-77] Sistema prefabbricato standard brevettato da *RDB*: (dall'alto, da sinistra) schema assonometrico di assemblaggio dei componenti strutturali impiegati per l'Istituto Tecnico Commerciale a La Spezia; sezione e dettaglio costruttivo del sistema adottato per l'I.C. "Farini" a Bologna; viste interne dell'I.C. "Jacopo della Quercia" a Bologna; vista interna ed esterna dell'I.C. "Pepoli" a Bologna.

IV.3 VALUTAZIONE DELLO STATO CONSERVATIVO PRESTAZIONALE

Nel panorama del patrimonio edilizio costituente il tessuto urbano della città, esistono frequenti episodi architettonici nei quali l'impiego di nuove tecniche costruttive si è tradotto nella formulazione di nuovi tipi edilizi. In particolare, nel caso dell'edilizia scolastica, le tecniche di prefabbricazione rappresentano il fattore determinante per la trasformazione di qualsiasi tipologia costruttiva tradizionale, suggerendo nuove opportunità per la realizzazione degli edifici di istruzione scolastica, grazie alle loro caratteristiche di economicità, intesa nel suo senso più ampio.

In questo contesto, gli edifici scolastici caratterizzati da sottosistemi strutturali in acciaio o in conglomerato cementizio armato, associati a pannelli di tamponamento in c.a., dotati di ampie superfici trasparenti, hanno contraddistinto un processo di diffusione della scuola dell'obbligo sul territorio, che appartiene indissolubilmente tanto alla storia della città, quanto alla storia dell'evoluzione delle tecniche edilizie dell'epoca in Italia compresa tra il 1960 e il 1980.

Durante questi anni, tale tipo di patrimonio edilizio offre la spinta ideale verso un processo di industrializzazione che, grazie ai suoi connotati di modulazione, standardizzazione, prefabbricazione e assemblaggio a secco in opera dei componenti, sembra essere più facilmente raggiungibile. L'impiego di materiali innovativi per la realizzazione degli edifici, affiancato dai presupposti di concreta semplicità realizzativa attribuiti al settore produttivo degli elementi costruttivi prefabbricati in c.a. o dei profili e manufatti in acciaio, contribuisce ad accrescere un sentimento di fiducia verso queste tecnologie e, a distanza di pochi anni, porta alla nascita di numerosi nuovi procedimenti costruttivi.

Gran parte del patrimonio edilizio scolastico italiano appartenente al periodo compreso tra la seconda metà degli anni Sessanta e l'inizio degli anni Settanta viene realizzato per mezzo delle tecniche di prefabbricazione, rispondendo in modo valido alla domanda in questo settore, offrendo la possibilità di raggiungere economie di scala per produzioni in serie, grazie all'omogeneità funzionale degli interventi specifici.

Purtroppo però, fin dall'origine della loro concezione, molti di questi procedimenti costruttivi impiegati non subiscono mai alcun tipo di affinamento formale a livello di componente o di sistema, presentando così importanti intrinseche carenze prestazionali. Alla base di queste deficienze risiedono gravi carenze progettuali, affiancate dalla mancanza dell'organico sistema di norme tecniche che dovrebbe invece accompagnare qualsiasi efficiente sistema produttivo industriale.

Oggi, le Amministrazioni devono riconoscere la necessità di recupero sul fronte tecnologico dell'esteso patrimonio edilizio scolastico realizzato mediante l'impiego di tali tecniche costruttive, prescindendo dai decadimenti di qualità estetica e architettonica e dalle inadeguatezze funzionali-distributive. In effetti, gli elementi costruttivi rivelano non soltanto gli effetti delle prolungate e intense sollecitazioni esterne (aggressione da parte degli agenti atmosferici) e interne (uso improprio

e vandalismo), bensì anche molti decadimenti di qualità provocati o aggravati da carenze gestionali, spesso dovute al mancato svolgimento degli interventi di manutenzione e alla effettiva assenza di un piano-programma di questi.

In particolare, alla base delle ipotesi di riqualificazione attinenti al sistema tecnologico, vengono posti obiettivi quali l'eliminazione di alcuni rischi strutturali e sismici, il miglioramento del comfort ambientale interno, il contenimento dei consumi energetici e l'efficientamento dell'involucro edilizio mediante materiali ecosostenibili.

L'esperienza di studio condotta durante la fase iniziale del progetto di ricerca prevede la valutazione dei trenta edifici scolastici ospitanti le Scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) appartenenti al Comune di Bologna, realizzate impiegando diversi sistemi costruttivi, principalmente appartenenti alle tecniche di prefabbricazione.

In particolare, le analisi si focalizzano sul patrimonio edilizio scolastico appartenente agli anni 1960-1980, tramite l'indagine conoscitiva e valutativa delle tecniche specifiche usate durante quest'epoca, alla luce delle trasformazioni avvenute in edilizia e in architettura, dal momento della loro concezione fino ai giorni nostri.

Per ciascun edificio di questo campione viene condotta una preliminare classificazione, svolta tramite la definizione dei dati generali anagrafici, l'individuazione dei parametri climatici del contesto in cui sono inseriti, le caratteristiche morfologiche dei fabbricati, le caratteristiche costruttive e strutturali, e lo stato conservativo prestazionale. Come già rilevato, nell'ambito degli interventi di recupero del patrimonio edilizio, riveste infatti un ruolo fondamentale la preliminare fase di acquisizione di una completa diretta conoscenza e comprensione della struttura architettonica dell'edificio inserito nel suo contesto, seguita da una corretta fase di valutazione della consistenza dell'organismo edilizio oggetto di intervento, affiancata da una approfondita analisi delle residue prestazioni.

La **prima fase di indagine conoscitiva** si fonda sulla necessità di formare un organico rapporto sulla consistenza quantitativa e qualitativa del singolo edificio, che comprenda la raccolta dei dati anagrafici, oltre che una analisi esauriente dei degradi visibili. Pertanto, risulta fondamentale la redazione di un protocollo da seguire per svolgere una approfondita analisi di carattere sistematico, grazie al quale è possibile compilare schede tecniche anagrafiche e di rilievo contenenti la descrizione di: strutture portanti, chiusure verticali, chiusure superiori e inferiori, partizioni interne verticali e orizzontali, impianti tecnici e tutti gli altri elementi costituenti l'organismo edilizio, fino ai suoi dettagli costruttivi.

Al fine di acquisire i dati necessari per lo svolgimento dell'analisi degli elementi riconosciuti come rilevanti, relativi ai sistemi costruttivi e ai requisiti prestazionali, si ricorre ai seguenti strumenti di ricerca:

- *ricerche archivistiche*, volte a consultare i disegni e gli elaborati originali di progetto, e le immagini storiche riguardanti le fasi di cantiere, depositate presso l'Archivio dell'Ufficio del genio civile di Bologna (che raccoglie i progetti risalenti al periodo dal 1915 al 1979), al fine di accertare lo stato conoscitivo relativo a parti inaccessibili e ai successivi lavori modificativi;
- *indagini bibliografiche*, funzionali all'acquisizione delle conoscenze specifiche alla base delle problematiche connesse al comportamento strutturale, energetico e ambientale degli edifici esistenti e alle modalità di gestione da parte delle Pubbliche Amministrazioni;
- *sopralluoghi speditivi e indagini dirette*, finalizzati a contestualizzare le criticità all'interno dell'edificato esistente, affiancando alle nozioni teorico-documentali una serie di casi di studio significativi individuati.

Una volta raggiunta una prima classificazione a carattere sistemico del patrimonio edilizio analizzato, segue la **seconda fase di valutazione dello stato conservativo**, rivolto a fornire una valutazione in merito alle prestazioni energetiche attuali dell'edificio, alla vulnerabilità sismica, e allo stato manutentivo degli edifici oggetto di intervento. La valutazione dello stato conservativo rappresenta uno degli strumenti maggiormente rilevanti ai fini della scelte progettuali da compiere in ambito di recupero del costruito, in relazione al miglioramento prestazionale che si vuole raggiungere, caratterizzato da un rapporto costi-benefici fondamentale per la definizione di una gerarchia delle priorità di intervento da parte dell'Ente gestore.

Tale valutazione può essere svolta secondo due modalità distinte, in funzione dell'entità degli interventi e della fase in cui essa subentra all'interno del processo di recupero:

- *valutazione speditiva*, svolta durante la fase preliminare, sulla base di un protocollo definito dall'operatore specializzato incaricato, scomposto nei vari ambiti valutativi considerati importanti, comprendenti i parametri e i fattori ritenuti fondamentali in accordo con le vigenti normative;
- *valutazione approfondita*, necessaria al fine di approfondire la valutazione preliminare e la relativa scala di priorità e gerarchia di interventi, al fine di fornire un giudizio più esaustivo e completo, dal punto di vista qualitativo e quantitativo, delle attuali prestazioni del fabbricato oggetto di intervento.

La valutazione speditiva, svolta all'interno del contesto relativo alla redazione di schede tecniche dell'intero patrimonio edilizio analizzato, fornisce le informazioni utili per la redazione di un data base anagrafico, implementabile nel tempo, secondo il progressivo approfondimento delle esigenze e delle analisi svolte. L'acquisizione delle informazioni relative all'intero patrimonio permette di ottenere un quadro sintetico di insieme, facilmente consultabile e confrontabile, al fine di individuare le principali criticità e di definire una gerarchia di priorità, di riferimento per

la programmazione di interventi e la ripartizione dei finanziamenti da parte della Pubblica Amministrazione. Attualmente sono già presenti sul mercato internazionale molti metodi di valutazione speditiva del patrimonio immobiliare, principalmente sviluppati all'interno di contesti accademici e di ricerca, che offrono un valido supporto scientifico per lo svolgimento di questo tipo di attività³¹. La ricerca in questo settore risulta in continuo sviluppo e progresso, rivolgendosi a un progressivo affinamento dei metodi valutativi e, al contempo, a una sempre maggiore sistematicità e dunque speditività degli stessi³².

La valutazione approfondita degli edifici, da svolgere successivamente alla definizione della scala di priorità attraverso la valutazione preliminare, rappresenta una fase fondamentale per la determinazione del livello prestazionale dell'edificio, come punto di partenza per definire gli interventi di riqualificazione necessari per raggiungere un livello prestazionale più elevato. Questa fase richiede necessariamente il supporto di strumentazioni specifiche per la misurazione in situ dei parametri coinvolti, relativi all'ambito morfologico-costruttivo (quali il Laser Scanner, integrato con la Fotogrammetria per il rilievo geometrico descrittivo), e all'ambito energetico (quali il Data-Logger elettronico per la misurazione dei fattori termodinamici e acustici, la Termocamera digitale per la valutazione del comportamento termico delle superfici radianti degli edifici). Occorre rilevare che il censimento e l'analisi del degrado degli elementi costruttivi appaiono talvolta di difficile

31 Per approfondimenti, si consultino alcuni esempi di metodi di valutazione speditiva: *Manuale M.E.R. – Metodo Estimativo Rapido del costo del ripristino edilizio* (Vicari J., Merminod P., 1984); *Metodo di valutazione della Qualità Edilizia Programmata* (Di Giulio R., Università di Ferrara, 1991); *Piano di Manutenzione: Il Manuale di Manutenzione* (Marsocci L., 1998); *Regolamento per la Certificazione di Qualità degli Immobili* (RINA SpA, 2006); *Sistema di verifica GBC Home - Per progettare, costruire e ristrutturare edifici residenziali* (GBC Italia, 2011); *Sistema di Certificazione LEED* (2009).

32 L'U.O. 3 Recupero e Restauro del CIRI Edilizia e Costruzioni dell'Università di Bologna (Responsabile Scientifico Prof. Riccardo Gulli) ha svolto una attività di ricerca volta alla definizione di un metodo di valutazione speditiva della qualità complessiva degli edifici. Il lavoro, al quale la candidata Cecilia Mazzoli ha partecipato attivamente, ha portato alla definizione del *Metodo BQE - Building Quality Evaluation*, redatto sulla base di approfondite ricerche in letteratura, e affinato progressivamente mediante test di verifica svolti su edifici campione resi disponibili da ER.GO - Azienda Regionale per il Diritto allo Studio.

“La metodologia di analisi *Building Quality Evaluation (BQE)* si pone l'obiettivo di formulare una valutazione della qualità globale di un edificio e di individuare, con la massima efficienza, le aree di intervento più significative per la definizione delle migliori strategie di valorizzazione e gestione. La metodologia si fonda sull'indagine e valutazione integrata di 3 classi. Ciascuna delle tre classi si compone a sua volta di 2 aree tematiche di dettaglio: per ciascuna delle 6 aree tematiche sono stati individuati gli elementi maggiormente caratterizzanti (indicatori) su cui si basano le valutazioni. Le valutazioni vengono formulate sulla base di normative e benchmark internazionali di riferimento al fine di garantire la migliore affidabilità e la validità scientifica della valutazione stessa. Gli indicatori scelti all'interno di ogni singola area tematica confluiscono in una valutazione parziale indipendente (espressa in percentuale) attraverso specifici metodi di calcolo. A ciascuna area tematica è anche associato un giudizio, basato su specifici range di variazione delle valutazioni, che determina un'indicazione qualitativa sulle performance ottenute. Le valutazioni espresse sulle singole aree tematiche confluiscono in una valutazione globale dell'ambito di riferimento a cui sono associate e, attraverso matrici di corrispondenza, individuano uno specifico livello, variabile da 5 (ottimo) a 1 (scadente). Lo score *BQE* è rappresentato dalla terna di valori determinata dal livello raggiunto in ciascuno delle tre classi di valutazione secondo il seguente ordine: Prestazionale, Manutentiva, Ambientale. Più alto è lo score, maggiore è la valutazione della qualità assegnata all'edificio oggetto d'indagine.” (CIRI Edilizia e Costruzioni, *BQE Building Quality Evaluation - Valutare la qualità complessiva degli edifici. Nota Metodologica*, aprile 2014)

realizzazione, come nel caso dello studio di elementi tecnici che, non essendo riportati nei disegni originali di progetto, possono richiedere saggi distruttivi o smontaggi irreversibili. In ogni caso, nonostante queste difficoltà, i degradi devono essere sistematicamente rilevati e correlati anche alla vita utile e al decadimento delle qualità complessive dell'organismo edilizio. Al fine di disporre di indici convenzionali di qualità tecnologica che siano confrontabili con le specifiche proprie del capitolato prestazionale da allestire per l'operazione di recupero, è necessario che le misurazioni dirette in opera siano integrate da calcoli, utili alla quantificazione delle prestazioni rilevanti (meccaniche, termiche, termoigrometriche, acustiche).

Di seguito viene fornito un quadro generale dello stato conservativo degli edifici scolastici prefabbricati analizzati, realizzati tra nel secondo dopoguerra, costituito dalla valutazione della loro classe prestazionale, articolata secondo i due prevalenti ambiti prestazionali:

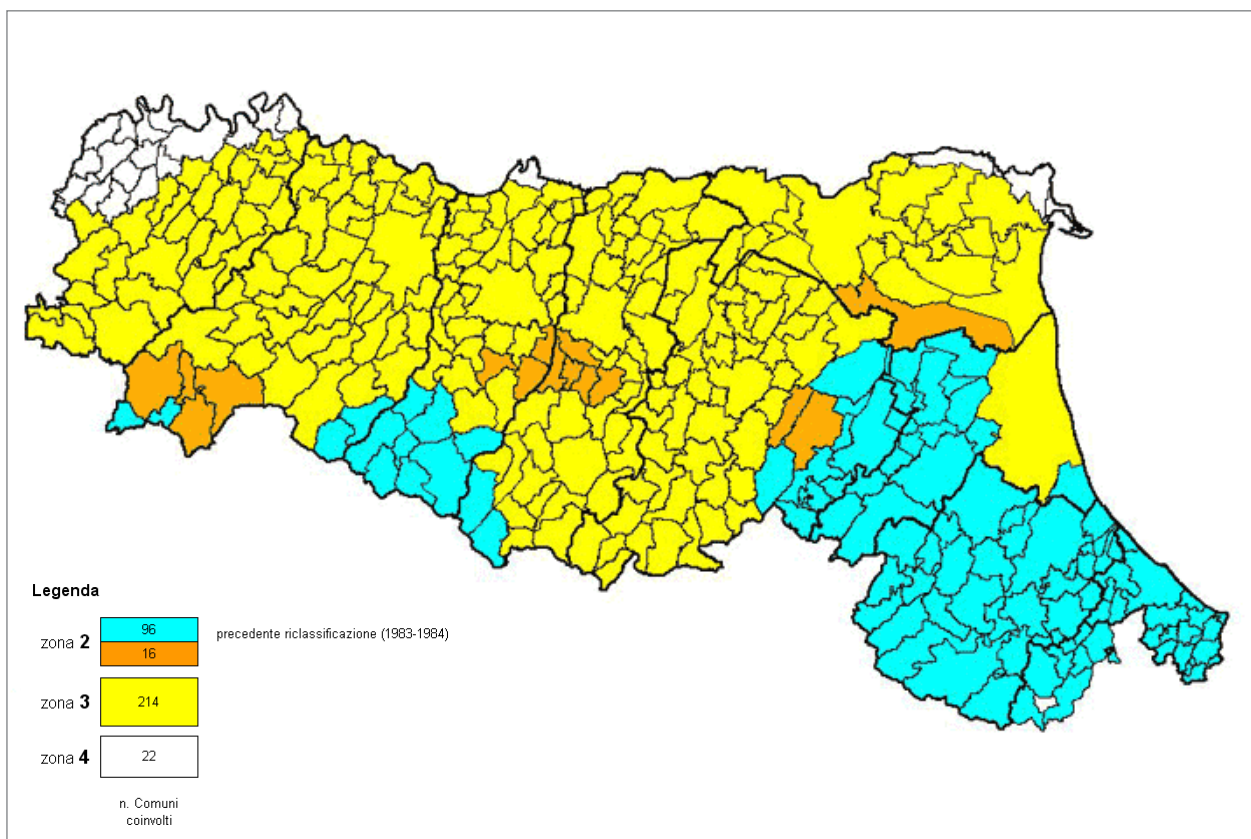
- **vulnerabilità sismica;**
- **prestazioni energetiche.**

IV.3.1 VULNERABILITÀ STRUTTURALE

In seguito alle analisi condotte sulle scuole prefabbricate, si può affermare che si tratta di organismi edilizi che, oltre alle carenze legate ai requisiti prestazionali energetici, alle condizioni di fruibilità, alle qualità estetico-architettoniche, attualmente presentano molteplici problematiche legate alla sicurezza statica e alla vulnerabilità sismica.

Lo studio delle tecniche di prefabbricazione lineare impiegate per questi edifici richiede dunque di prestare grande attenzione allo schema strutturale, alla composizione e al montaggio degli elementi, con particolare riguardo alle soluzioni di connessione tra i singoli elementi prefabbricati e, a scala maggiore, tra i singoli manufatti prefabbricati, per il trasferimento delle sollecitazioni. Il tema assume così ulteriore valore, in relazione ai problemi strutturali indotti recentemente dal sisma in Emilia su edifici che, come quelli che costituiscono la maggior parte del patrimonio edilizio scolastico esistente, sono stati realizzati utilizzando tecniche costruttive prefabbricate, nel rispetto delle norme vigenti in quegli anni.

La verifica delle condizioni di sicurezza nei confronti delle azioni di tipo sismico, e dunque



[Fig. 78] Classificazione sismica dei Comuni dell'Emilia-Romagna, secondo le zone 2, 3, 4, secondo l'Ordinanza del PCM n. 3274 / 2003 (Allegato 1, punto 3 "prima applicazione").

della fruibilità del patrimonio esistente, acquisisce ulteriore rilievo alla luce del sisma che il 20 maggio 2012 ha colpito il territorio emiliano, sottoposto a numerose scosse per prolungati mesi³³. Il forte sisma, che a sua volta ha innescato un fenomeno di liquefazione dei terreni, si è imprevedibilmente verificato nel terreno emiliano, caratterizzato da suoli paludosi ad alta viscosità, pertanto classificati come “Zona 3 - Bassa sismicità”, secondo la classificazione sismica del 2004 (Recepimento da parte delle Regioni e delle Province autonome dell’*Ordinanza PCM 20 marzo 2003, n. 3274*) [Fig. 78]. Le continue scosse di magnitudo compresa tra i 2 e i 5 gradi hanno portato talvolta alla chiusura per dichiarata inagibilità di alcune scuole anche nel Comune di Bologna, nonostante la relativa distanza dall’epicentro del sisma (nel Modenese, nel Ferrarese e nel Reggiano).

Risulta pertanto di grande interesse condurre una analisi approfondita del patrimonio edilizio scolastico che consideri opportunamente la rilevanza di questi aspetti, fornendo così un valido strumento di valutazione comparativa dello stato conservativo dei fabbricati scolastici, ai fini della previsione e progettazione di interventi futuri di adeguamento e miglioramento strutturale degli stessi.

La tematica acquista ulteriore importanza in relazione alla completa assenza delle problematiche di vulnerabilità sismica all’interno delle metodologie progettuali che hanno regolato la realizzazione di tale patrimonio fin dalla loro origine, ma che attualmente acquisiscono una notevole rilevanza. Nonostante si sia cominciato soltanto recentemente, a seguito di precise indicazioni normative, a intervenire per ridurre la vulnerabilità sismica degli edifici esistenti, occorre rilevare che il patrimonio edilizio italiano ha più volte dato segni inequivocabili di cedimenti e successiva

33 Alle ore 4.04 del 20 maggio 2012, un terremoto di magnitudo 5.9 interessa i territori dell’area nord della Penisola italiana, causando sette vittime, di cui cinque per conseguenze dirette determinate dall’evento sismico e due per cause concomitanti. Il terremoto interessa prevalentemente i comuni delle province di Modena e Ferrara e, in misura minore, quelli di Bologna e Mantova.

In base alle registrazioni dell’INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, l’epicentro della scossa principale viene localizzato tra i comuni di Finale Emilia e San Felice sul Panaro (provincia di Modena), e Sermide (provincia di Mantova). I Comuni interessati dall’evento sono classificati in “Zona 3 - Bassa Sismicità”, secondo la Delibera del Consiglio Regionale dell’Emilia Romagna del 21 luglio 2003, n. 1435. Dalle informazioni pervenute dal territorio, si apprende che gli edifici abitativi risultano in buona parte integri. Si registrano danni soprattutto agli edifici di culto, ai beni storico-culturali e ai capannoni industriali. Considerata la rilevanza dell’evento, il Presidente del Consiglio dei Ministri emana la dichiarazione dell’eccezionale rischio di compromissione degli interessi primari, in base a quanto previsto dalla Legge 27 dicembre 2002, n. 286 e in previsione della successiva dichiarazione dello stato di emergenza. Il 22 maggio il Consiglio dei Ministri delibera lo stato di emergenza per i territori delle province di Ferrara, Modena, Mantova e Bologna e ne fissa la durata a sessanta giorni. Lo stato di emergenza è deliberato in base a quanto disposto dal D.L. 30 aprile 2012, n. 59 che modifica la Legge 24 febbraio 1992, n. 225, istitutiva del Servizio Nazionale. Il coordinamento degli interventi è inizialmente affidato al Capo del Dipartimento della Protezione Civile, per poi essere attribuito alle Regioni Emilia-Romagna e Lombardia, ciascuna per i territori di competenza, alla conclusione dello stato di emergenza.

Il 22 maggio 2012 il Capo Dipartimento della Protezione Civile, Franco Gabrielli, firma l’ordinanza che dispone i primi interventi urgenti di protezione civile per il soccorso, l’assistenza alla popolazione e gli interventi provvisori strettamente necessari per le popolazioni colpite dal terremoto. Dopo il terremoto di magnitudo 5.9 alle 4.04 del 20 maggio 2012, avvertito in gran parte del nord Italia e localizzato tra le province di Ferrara, Modena, Mantova e Bologna, il 29 maggio alle ore 9 si verifica un nuovo evento sismico in provincia di Modena di magnitudo 5.8. Diverse repliche interessano anche le province di Reggio Emilia e Mantova, tra cui una scossa di magnitudo 5.3 alle ore 12.55. (Rassegna stampa della Protezione Civile, 30/05/2012)

scarsa sicurezza: dai crolli episodici di edifici susseguitesesi negli anni passati, che suscitarono riflessioni sulla necessità di definire strategie di monitoraggio delle condizioni statiche, fino ai recenti avvenimenti legati al sisma in Emilia del 20 maggio 2012³⁴.

In seguito agli avvenimenti sismici che hanno colpito più recentemente il territorio italiano, si è acquisita progressivamente la consapevolezza che le situazioni critiche non riguardino soltanto il patrimonio tipicamente in muratura di più antica realizzazione, caratterizzante i centri storici, bensì anche l'edificato costruito più recentemente, connotato da un utilizzo massiccio di strutture in conglomerato cementizio armato. Quest'ultimo, caratterizzato in gran parte dall'impiego del sistema intelaiato, è stato per lungo tempo considerato patrimonio esente da vulnerabilità strutturali, in particolar modo legate agli eventi sismici. Nel corso degli anni, questa parte di patrimonio ha invece mostrato molteplici segni di gravi carenze, causate dall'insufficiente qualità dei materiali e dall'adozione di soluzioni strutturali spesso non idonee.

Soltanto recentemente, quindi, in seguito alla classificazione sismica avviata a partire dal 2003 con l'*OPCM 3274*, nel contesto della revisione della *Normativa Tecnica per le Costruzioni*, si è giunti alla consapevolezza dell'elevata vulnerabilità strutturale del patrimonio edilizio presente

34 Nelle settimane precedenti l'emissione dell'Ordinanza 2 del 16 giugno 2012, sono state condotte verifiche dell'agibilità post-sismica su 429 edifici ad uso scolastico nelle quattro province emiliane interessate dal sisma. Di queste, 191 sono risultate agibili, 152 temporaneamente o parzialmente inagibili (esiti B e C), 9 temporaneamente inagibili e da riverificare in modo più approfondito (D), 65 inagibili (E) e 12 inagibili per rischio esterno (F). In particolare, dei 199 plessi scolastici verificati nella provincia di Ferrara sono 100 quelli agibili, 60 quelli temporaneamente o parzialmente inagibili, 32 inagibili e 5 inagibili per rischio esterno. Nel modenese, su 149 edifici scolastici verificati, 53 sono agibili, 67 parzialmente o temporaneamente inagibili, 23 inagibili e 6 inagibili per rischio esterno. Nella provincia di Bologna su 54 strutture, 22 sono agibili, 25 temporaneamente o parzialmente inagibili e 7 inagibili, mentre in provincia di Reggio Emilia su 27 totali sono 16 quelle agibili, 7 quelle temporaneamente o parzialmente inagibili, 3 quelle inagibili cui se ne aggiunge 1 inagibile per rischio esterno. In sintesi, nelle province interessate si presenta una situazione tale per cui il 45% dei plessi ad uso scolastico è agibile, e il 38% agibile con provvedimenti. Il lavoro di verifica viene condotto da squadre di rilevatori del Sistema di Protezione civile nazionale (circa 300 tra personale appartenente alle Regioni, agli Enti locali, alle Università dell'Emilia-Romagna e agli Atenei che operano nell'ambito della rete di laboratori di ingegneria sismica ReLUIS), ma anche da tecnici del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco e delle Forze armate, con il concorso di professionisti formati con corsi specifici (definiti da precedenti protocolli d'intesa siglati con i consigli nazionali di geometri, architetti e ingegneri).

L'Ordinanza 2 del 16 giugno 2012 persegue l'obiettivo di rendere agibile entro l'inizio dell'anno scolastico 2012/2013 il maggior numero di strutture danneggiate dal sisma che ha colpito in particolare l'Emilia. Infatti, tale ordinanza del presidente Vasco Errani consente a Comuni e Province di procedere alla riparazione degli edifici lievemente danneggiati. Il 16 giugno 2012 il commissario delegato alla ricostruzione, Vasco Errani, firma l'ordinanza che coordina gli interventi su scuole e strutture per la prima infanzia e dà mandato ai sindaci e ai presidenti di Provincia a procedere alla messa in sicurezza, incrementando la "capacità di resistere al sisma" con opere di rafforzamento progettate ai sensi della normativa del 2008. Mentre si rimanda ad altri provvedimenti la sorte degli edifici scolastici che hanno subito gravi danni, l'atto firmato il 16 giugno 2012 dal presidente Vasco Errani consente a Comuni e Province (a seconda della tipologia di scuole) di procedere agli interventi di riparazione per gli edifici scolastici il cui esito di agibilità è stato classificato dai tecnici come B o C. Al momento della firma dell'ordinanza, gli interventi riguardano i 152 plessi scolastici che, in base alle verifiche, sono stati giudicati temporaneamente o parzialmente inagibili (esito di agibilità B o C), con l'intento di riuscire a riaprirli a settembre, con l'inizio dell'anno scolastico. Altri 9 edifici temporaneamente inagibili sono da riverificare in modo più approfondito (esito D). Per gli edifici gravemente danneggiati, le decisioni da prendere in merito agli interventi vengono invece definite con provvedimenti successivi.

nel territorio italiano.

Le indagini hanno determinato la presenza di numerose strutture progettate e realizzate, anche in tempi relativamente recenti, senza l'adozione di criteri di progettazione antisismica, in quanto non previsti dalle normative tecniche vigenti in aree non classificate come sismiche.

Tra queste costruzioni, particolari criticità sono state manifestate dagli edifici realizzati mediante l'assemblaggio di elementi prefabbricati in conglomerato cementizio armato, per la maggior parte atti ad accogliere insediamenti industriali e produttivi, e attività scolastiche. Quest'ultima categoria di edifici scolastici, progettati in assenza di criteri antisismici, sono classificabili sulla base delle loro caratteristiche costruttive e strutturali delineate sinteticamente di seguito³⁵.

In generale, si tratta principalmente di edifici prefabbricati pluripiano, tipicamente a due o tre piani. Tali strutture sono intelaiate e costituite da pilastri monolitici a tutta altezza, dalle travi portanti (sezione a T rovescio, sezione a L, bordi paralleli), dagli impalcati e dalla copertura. Per lo specifico impiego come componenti degli impalcati intermedi, i tegoli sono completati in opera da getti di calcestruzzo armato con spessori variabili fra 5 e 10 cm che, oltre a incrementare le caratteristiche meccaniche, adempiono alle funzioni di distribuzione dei carichi e solidarizzazione dell'insieme strutturale, con luci variabili da 10 a 15 m. Mentre gli impalcati intermedi sono in genere costituiti da tegoli nervati, le coperture prevalentemente piane sono realizzate principalmente mediante pannelli in c.a. o in c.a.p. nervati, o ancora con tegoli a π , posati sulla mensola inferiore delle travi, poste a luci indicativamente da 8 m a 15 m. La copertura è completata con manti impermeabilizzanti di vario tipo (guaine bituminose e guaine polimeriche).

Questi edifici possono essere completati mediante la realizzazione di qualsiasi tipo di tamponamento, che può essere posto in luce di pilastro o esternamente al pilastro. In entrambi i casi, le chiusure verticali possono essere realizzate con murature in blocchi (in laterizio o in calcestruzzo) o con pannelli prefabbricati in c.a. orizzontali o verticali.

Tali strutture prefabbricate, non soggette ad azione sismica, sono state progettate verificandone la stabilità locale e di insieme (*D.M. 3 dicembre 1987 - Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni prefabbricate*), considerando soltanto i seguenti carichi:

- carichi gravitazionali, permanenti e portati;
- vento (*D.M. 16 gennaio 1996* e precedenti);
- neve (*D.M. 16 gennaio 1996* e precedenti);
- eventuali carriponte (*CNR-UNI 10021-73*).

I sistemi edilizi prefabbricati vengono concepiti come veri e propri sistemi strutturali gravitativi, costituiti cioè da un insieme di elementi costruttivi, suddivisi in elementi portanti ap-

35 Bonfanti C., Carabellese A., Toniolo G. (a c. di), *Strutture prefabbricate: catalogo delle tipologie esistenti*, Reluis - Assobeton, febbraio 2008. (www.reluis.it)

poggiati a terra, sui quali poggiano direttamente elementi portati.

Così come nello schema della struttura primitiva del trilito l'elemento portato (architrave) è soltanto appoggiato agli elementi portanti (piedritti), analogamente, nelle strutture prefabbricate gli elementi portati (travi, lastre di solaio prefabbricate, tegoli di copertura) sono legati alla struttura portante (pilastri, setti portanti) esclusivamente da vincoli di appoggio.

In assenza di vincoli a cerniera tra la gerarchia degli elementi costruttivi, la struttura così composta non è in grado di resistere alle sollecitazioni orizzontali che, come quelle provocate dal sisma, costituito da una componente oscillatoria e una sussultoria (quest'ultima particolarmente accentuata durante l'evento sismico accaduto in Emilia), comportano grosse instabilità in corrispondenza dei nodi e dei punti di discontinuità dello scheletro.



[Fig. 79-82] Interventi di ripristino delle connessioni tra travi e pilastri (in alto) e tra tegoli e travi (in basso), svolti per la Scuola Media “Guercino”, sulla base del progetto del DICAM (Università degli Studi di Bologna) e realizzati dall’Impresa Schiavina Srl. L’I.C. n.9 “Guercino” appartiene al piano integrato di realizzazione di cinque Istituti Comprensivi nel Comune di Bologna realizzati secondo il medesimo progetto, tra cui anche l’I.C. n.1 “Dozza”, oggetto di analisi: infatti, i meccanismi di danno e le patologie di degrado riscontrati in questo fabbricato risultano essere i medesimi fra i fabbricati identici.

Coerentemente con quanto delineato dalle *Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici*, redatto nel giugno 2012, si espongono di seguito i principali danneggiamenti che le strutture oggetto di studio hanno presentato in seguito al sisma, al fine di analizzarne la vulnerabilità strutturale³⁶.

PERDITA DI APPOGGIO E DANNI ALLE CONNESSIONI TRA ELEMENTI STRUTTURALI

La causa più frequente di danneggiamento negli edifici prefabbricati è la perdita di appoggio degli elementi strutturali orizzontali dagli elementi di supporto: questo fenomeno è dovuto, nella maggior parte dei casi, all'assenza di vincoli di tipo meccanico, ossia in condizioni in cui il collegamento consiste soltanto nell'attrito dovuto alla trasmissione delle forze orizzontali. Un'altra causa di collasso di questo tipo di collegamenti trave-pilastro, seppure con minor frequenza, consiste invece nella crisi del calcestruzzo, evidenziata dalla rottura del copriferro e dall'espulsione dello spinotto.

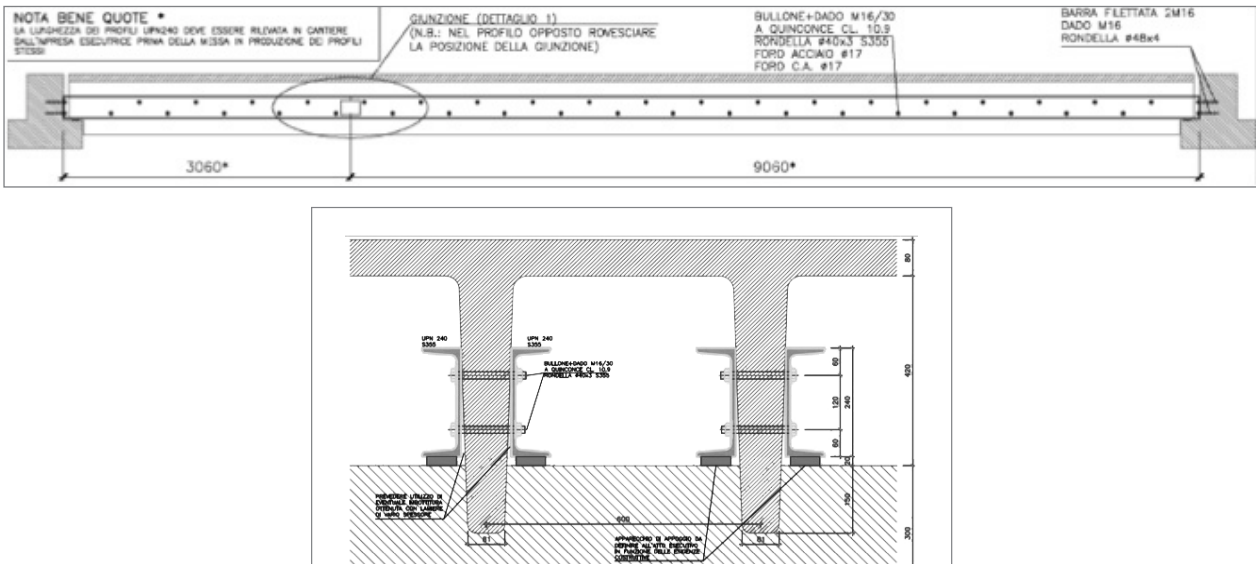
Anche se in forma più lieve rispetto ai collassi riscontrati negli edifici industriali, gli edifici scolastici prefabbricati di Bologna presentano gli stessi meccanismi di danno subiti dai capannoni industriali sparsi sul territorio emiliano, dovuti alla perdita di appoggio delle travi rispetto ai pilastri di supporto, sui quali sono semplicemente appoggiate grazie alla presenza di alette o mensole, senza l'inserzione di perni o altri vincoli a cerniera che consentano la rotazione relativa tra le parti strutturali.

Gli interventi volti al recupero di queste strutture, peraltro realizzati nei mesi immediatamente successivi dal Comune di Bologna, sono mirati pertanto al ripristino dei vincoli di connessione tra i vari componenti strutturali. In particolare, il Comune di Bologna ha scelto di risolvere questo problema mediante l'inserimento di appositi dispositivi di connessione, costituiti da piastre di collegamento trave-pilastro, analoghi a quelli utilizzati per gli interventi di ripristino dei collegamenti tegolo-trave. Si tratta di angolari metallici³⁷ che, dopo un previo trattamento di pulizia adeguato delle superfici, vengono ancorati mediante barre filettate, imbullonate su entrambe le ali del profilo, in modo tale da ancorarsi ad entrambi gli elementi strutturali [Fig. 79-82].

Mediante l'installazione di questi presidi antisismici, le analisi numeriche svolte sui modelli dimostrano quantitativamente la possibilità di raggiungere un livello più elevato di sicurezza sismica, migliorando il comportamento meccanico degli edifici prefabbricati.

³⁶ Federazione Regionale Ordine Ingegneri dell'Emilia Romagna, Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali, *Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici*, giugno 2012.

³⁷ Questi dispositivi antisismici di ripristino dei collegamenti tra elementi strutturali sono stati studiati e progettati dall'Università di Bologna (DICAM), e applicati in seguito ad analisi numeriche e sperimentali in alcune delle Scuole di Bologna (ad esempio per l'I.C. n.9 "Guercino"), ad opera dell'Impresa Schiavina.



[Fig. 83-88] Interventi di consolidamento e risanamento delle fessurazioni, svolti per la Scuola Media “Guercino” sulla base del progetto del DICAM (Università degli Studi di Bologna) e realizzati dall’Impresa Schiavina Srl. L’I.C. n.9 “Guercino” appartiene al piano integrato di realizzazione di cinque Istituti Comprensivi nel Comune di Bologna realizzati secondo il medesimo progetto, tra cui anche l’I.C. n.1 “Dozza”, oggetto di analisi: infatti, i meccanismi di danno e le patologie di degrado riscontrati in questo fabbricato risultano essere i medesimi fra i fabbricati identici.

DANNI AGLI ELEMENTI LINEARI: PILASTRI, TRAVI, TEGOLI

Generalmente, nelle strutture prefabbricate mono o pluripiano, gli elementi resistenti verticali, ossia i pilastri, sono generalmente elementi vincolati al piede tramite un vincolo d'incastro, costituito da un plinto a bicchiere, mentre in testa sono collegati alle travi tramite vincoli a cerniera o, più comunemente, a carrello. Pertanto, lo schema statico del pilastro è quello di una mensola incastrata all'estradosso del bicchiere.

In presenza di forti sollecitazioni, come quelle indotte da un terremoto, può accadere che si verifichi una rotazione rigida al piede, in seguito alla quale il pilastro perda la verticalità. Questo tipo di danno può essere associato alla rotazione dell'intero elemento di fondazione, ma anche al danneggiamento dei componenti in conglomerato cementizio armato (bicchieri, plinti). L'attribuzione a una categoria o all'altra di danno richiede una accurata analisi post-sisma del complesso terreno-fondazione.

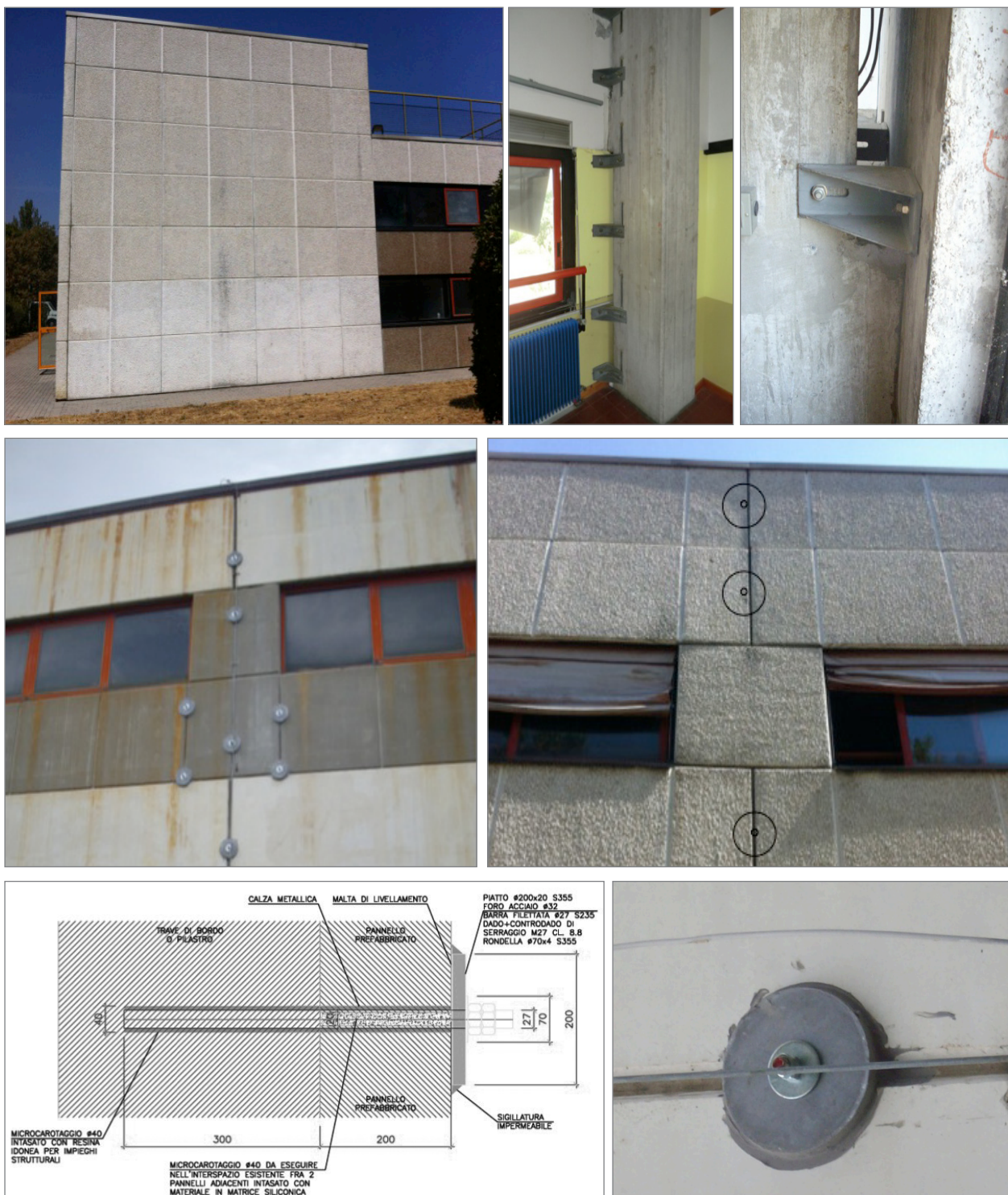
Uno dei danni più significativi e visibilmente riscontrabili negli edifici prefabbricati consiste nella formazione di cerniere plastiche alla base dei pilastri, tradotta nella formazione di fessurazioni, o nell'espulsione del copriferro e nella conseguente instabilizzazione delle barre, in carenza di armatura trasversale.

Inoltre, in molteplici casi si è verificato un grave danneggiamento dei pilastri indotto dall'impatto degli elementi orizzontali, quali travi e tegoli, collassati per perdita di appoggio.

Anche nelle scuole prefabbricate di Bologna si riscontra questo meccanismo di danno, anche se comunque in forma lieve. In particolare, in numerose scuole si riscontra la formazione di fessurazioni lungo pilastri, in corrispondenza di travi o tegoli di copertura che, a seguito delle sollecitazioni orizzontali del sisma, sono fuoriusciti dalla loro sede originaria di semplice appoggio, provocando così delle azioni di martellamento sui pilastri sottostanti.

Un possibile intervento per risanare le fessurazioni provocate dall'azione sismica sugli elementi strutturali portanti consiste nell'inserimento di profili in acciaio di contenimento. Ad esempio, in alcune Scuole di Bologna, il Comune ha deciso di risanare i tegoli di copertura danneggiati inserendo una coppia di profili UPN, disposti su entrambi i lati della nervatura del tegolo fessurato, con l'anima adiacente ad essa, connessi tra loro da barre filettate passanti³⁸. [Fig. 83-88]

³⁸ Questi dispositivi antisismici di risanamento degli elementi strutturali portanti sono stati studiati e progettati dall'Università di Bologna (DICAM), e applicati in seguito ad analisi numeriche e sperimentali in alcune delle Scuole di Bologna (ad esempio per l'I.C. n.9 "Guercino"), ad opera dell'Impresa Schiavina.



[Fig. 89-95] Interventi di ripristino delle connessioni tra i pannelli di tamponamento esterno e la struttura portante, svolti per la Scuola Media “Guercino”, sulla base del progetto del DICAM (Università degli Studi di Bologna) e realizzati dall’Impresa Schiavina Srl. L’I.C. n.9 “Guercino” appartiene al piano integrato di realizzazione di cinque Istituti Comprensivi nel Comune di Bologna realizzati secondo il medesimo progetto, tra cui anche l’I.C. n.1 “Dozza”, oggetto di analisi: infatti, i meccanismi di danno e le patologie di degrado riscontrati in questo fabbricato risultano essere i medesimi fra i fabbricati identici.

COLLASSO DEGLI ELEMENTI DI TAMPONAMENTO

Il sistema di chiusura degli edifici prefabbricati è costituito, nella maggior parte dei casi, da pannelli prefabbricati in calcestruzzo armato, disposti orizzontalmente o verticalmente, che possono essere ancorati ai pilastri o alle travi attraverso diverse tipologie di connessione: se sottoposti alle sollecitazioni orizzontali del sisma, questi elementi di ancoraggio puntuale possono crollare, provocando il crollo dei pesanti pannelli di tamponatura.

In alcuni casi, il crollo di pannelli può essere associato al martellamento degli elementi di copertura o degli stessi pilastri, o ancora in corrispondenza degli spigoli o dei pannelli ortogonali. Un'altra possibile causa del crollo degli elementi di tamponamento consiste nell'instabilità provocata dal differente spostamento dei due pilastri, nel caso in cui i pannelli orizzontali siano vincolati da una parte a pilastri che portano la copertura e dall'altra a pilastri rompitratta.

Anche nei casi di edifici costituiti da scheletro portante in conglomerato cementizio armato e tamponamenti in laterizio, le chiusure possono subire gravi danni (fessurazioni importanti per meccanismi in piano) o ancora crolli per ribaltamento (meccanismi fuori dal piano).

Gli edifici scolastici analizzati, collocati nel Comune di Bologna, presentano segni di danneggiamento degli elementi di tamponamento. La maggior parte delle chiusure esterne verticali è realizzata in pannelli prefabbricati di cemento armato che, in seguito alle sollecitazioni orizzontali del sisma, hanno presentato un parziale distacco dagli elementi portanti (travi e pilastri), dovuto al cedimento delle connessioni originarie, spesso costituite da collegamenti metallici angolari, detti *halfen*.

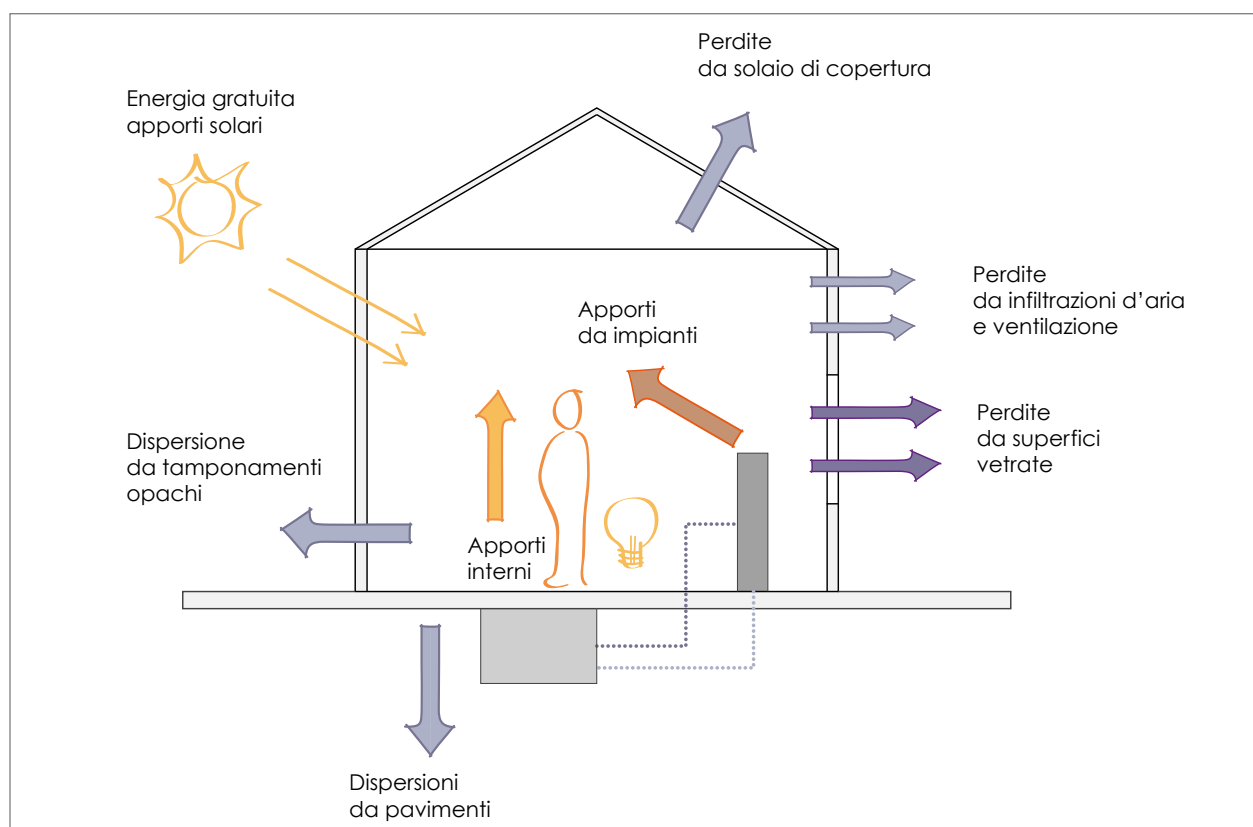
Gli interventi volti alla risoluzione dei cinatismi di ribaltamento dei pannelli esterni fuori dal piano, eseguiti dal Comune di Bologna in seguito al sisma, hanno previsto l'inserimento di piatti metallici ancorati al pannello esterno mediante una barra filettata imbullonata, volta ad ancorare puntualmente i tamponamenti alla struttura portante (travi e pilastri) [Fig. 89-95].

IV.3.2 PRESTAZIONI ENERGETICHE

In seguito alla analisi svolte sugli edifici scolastici selezionati dalla ricerca, fortemente connessi tra loro per il periodo di appartenenza, le tecniche costruttive con cui sono stati realizzati, e la loro consistenza materica, si può affermare che le scuole realizzate durante gli anni Sessanta e Settanta presentano attualmente significative carenze prestazionali.

Queste criticità sono dovute alla scarsa attenzione posta originariamente, al momento della loro progettazione, verso le strategie ambientali e verso la qualità dei materiali con scarsa durabilità, selezionati secondo politiche di somma urgenza e criteri di economicità.

Occorre rilevare che la maggior parte di questi edifici sono stati realizzati in assenza di linee guida di riferimento ambientale che, ad eccezione delle sommarie indicazioni fornite dai bandi di gara indetti dalla Pubblica Amministrazione per elargire finanziamenti per la realizzazione di scuole in tempi ridotti, sono state emanate soltanto nel 1975³⁹.



[Fig. 96] Schema illustrativo del bilancio energetico per i fabbricati abitati, tenendo conto degli apporti di calore provenienti dall'esterno (radiazione solare) e dall'interno (persone, impianti, fonti di calore), e delle perdite di calore dovute alle dispersioni dell'involucro edilizio (pavimenti, tamponamenti, superfici vetrate e solai di copertura), dalle infiltrazioni d'aria e dalla ventilazione.

39 D.M. 18 dicembre 1975 - *Norme Tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica*

Attualmente, la normativa vigente di riferimento per l'edilizia scolastica rimane il D.M. 18 dicembre 1975 ma, in aggiunta a questo, sono state elaborate ulteriori norme nazionali e internazionali, nelle quali il tema del comportamento energetico assume un ruolo sempre più centrale.

Le significative carenze dal punto di vista prestazionale energetico riguardano una serie di aspetti significativi ricorrenti negli edifici analizzati:

- eccessive dispersioni termiche attraverso l'involucro (trasparente e opaco) e conseguenti eccessivi costi per l'impianto di riscaldamento invernale;
- eccessivi carichi termici dovuti all'incidenza della radiazione solare non schermata, né mediante appositi dispositivi di ombreggiamento, né mediante l'impiego di vegetazione per il controllo del microclima;
- in definitiva, scarsa qualità dell'ambiente termoigrometrico e del comfort interno.

In generale, la domanda di energia termica relativa alla climatizzazione di un edificio viene stimata sulla base di un bilancio termico dell'ambiente delimitato dall'involucro edilizio che, a sua volta, è collegato ad un più generale **bilancio energetico dell'edificio** che contempla anche gli altri usi finali dell'energia [Fig. 96].

I carichi termici sensibili sono di due tipi:

- in ingresso o interni all'edificio (assunti positivi per convenzione);
- in uscita dall'edificio (assunti negativi per convenzione).

In termini di potenza termica media, riferita ad un particolare intervallo di tempo $d\tau$, il bilancio energetico è rappresentato dalla seguente espressione:

$$Q_{nd} + Q_{sol} + Q_{int} + Q_{tr} + Q_{ve} = C \cdot dt / d\tau$$

con:

Q_{nd} : potenza fornita dall'impianto all'ambiente interno;

Q_{sol} : potenza fornita dalla radiazione solare;

Q_{int} : potenza fornita dalle fonti di calore interne all'edificio (persone, lampade, macchine, ...);

Q_{tr} : potenza uscente trasmessa attraverso l'involucro edilizio;

Q_{ve} : potenza uscente veicolata dal flusso d'aria di ventilazione.

Il termine al secondo membro rappresenta la variazione di energia interna del sistema nel tempo, che si può esprimere come il prodotto della capacità termica efficace⁴⁰ dell'edificio C per la variazione della sua temperatura media nell'intervallo di tempo considerato $dt/d\tau$.

⁴⁰ Per "capacità termica efficace" si intende la capacità termica di quella parte della massa dell'edificio che effettivamente immagazzina e restituisce energia termica nell'intervallo di tempo considerato.

Un bilancio termico dettagliato richiede la definizione di intervalli temporali sufficientemente piccoli (orari o sub-orari) e la scomposizione dell'edificio in parti omogenee secondo i criteri relativi alle proprietà fisiche e termiche (legate ai materiali) e alle condizioni al contorno ambientali (ad esempio, l'irraggiamento solare).

Per motivi pratici, nella prassi progettuale corrente si utilizzano bilanci semplificati, su base stagionale o mensile, eseguibili con normali fogli di calcolo. Di questo tipo è il metodo di calcolo contenuto nella norma europea *EN ISO 13790:2008 - Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*. La legislazione italiana fa riferimento alla suddetta norma mediante alcune norme UNI che definiscono le modalità per la sua applicazione nazionale ai fini del calcolo del fabbisogno di energia primaria relativo alla climatizzazione estiva ed invernale degli edifici: *UNI/TS 11300-1* e *UNI/TS 11300-2*. In ogni caso, la normativa italiana consente e consiglia l'uso di metodi di calcolo più dettagliati, qualora si disponga dei dati climatici necessari, ovvero su base oraria.

Secondo le *Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*, gli edifici vengono classificati in base ad un indice di prestazione energetica globale, che rappresenta l'energia consumata in un anno per scaldare un m² o un m³ di edificio. La scelta di calcolare il fabbisogno su superficie o su volume dipende dalla destinazione d'uso dell'edificio: generalmente si calcola il volume [m³], mentre soltanto per l'edilizia residenziale si calcola la superficie [m²].

Dal punto di vista del comportamento energetico e della dispersione del calore verso l'esterno, la configurazione di ogni tipo edilizio permette una differente potenzialità di risparmio energetico in rapporto all'articolazione dell'edificio stesso. Il rapporto di forma *S/V*, come specificato dal *D.lgs. 29 dicembre 2006, n.311*⁴¹, rappresenta il rapporto tra la superficie disperdente e il volume lordo costituente l'edificio⁴². Risulta evidente che una configurazione compatta dell'edificio, dotata di un indice *S/V* ridotto, consente di disperdere meno calore rispetto a un edificio di forma più articolata che, con un indice elevato *S/V*, favorisce il flusso termico dagli ambienti riscaldati interni a quelli esterni. Il fattore di forma non è l'unico fattore che influisce sul comportamento energetico di un edificio, ma sicuramente rappresenta un punto molto importante per una prima valutazione prestazionale.

Un altro fattore importante è dato dai gradi giorno [GG]. Il GG è l'unità di misura utilizzata per individuare la zona climatica di appartenenza a ciascun comune: il suo valore rappresenta la somma, estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento, delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente e la temperatura media esterna gior-

41 D.lgs. 29 dicembre 2006, n.311 - *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia*

42 Si precisa che per "superfici disperdenti" si intendono tutte le strutture misurate al lordo collocate tra la zona termica esaminata e l'ambiente esterno e il terreno, oppure verso i locali non riscaldati. Il volume lordo è definito dalle parti di edificio riscaldate e delimitato dalle superfici disperdenti.

naliera.

Per ogni rapporto S/V e per ogni località in base ai suoi GG , a partire dall'Allegato C del *D.lgs. 29 dicembre 2006, n.311*, vengono fissati per interpolazione i valori limite di legge da non superare, espressi in $[kWh/m^2.anno]$, oppure in $[kWh/m^3.anno]$ se si tratta di edifici non residenziali ($EP_{I\ limite}$)⁴³.

In questo modo, il territorio nazionale viene classificato secondo zone climatiche (da A a F), indipendenti dall'ubicazione geografica, ai fini di definire dei valori utili per il contenimento di energia necessaria al funzionamento degli impianti termici di riscaldamento.

In particolare, Bologna appartiene alla zona climatica E, che comprende le località italiane con GG compresi tra 2.100 e 3.000, e che prevede il raggiungimento di determinati valori di trasmittanza termica U , definiti dalle tabelle riportate nella pagina seguente.

43 Considerando il rapporto S/V , il sistema di certificazione nazionale tollera anche edifici di forma più frammentata, permettendo dispersioni maggiori (fattore totalmente escluso con lo standard *CasaClima*). Due edifici con medesimo consumo possono quindi appartenere a categorie diverse, in quanto la discriminante consiste nel tipo di forma scelta nella composizione.

VALORI DELLA TRASMITTANZA TERMICA U DELLE STRUTTURE VERTICALI			
ZONA CLIMATICA	DAL 1/1/2006 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2008 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2010 [W/(m ² .K)]
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

VALORI DELLA TRASMITTANZA TERMICA U DELLE STRUTTURE OPACHE ORIZZONTALI O INCLINATE DI COPERTURA			
ZONA CLIMATICA	DAL 1/1/2006 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2008 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2010 [W/(m ² .K)]
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

VALORI DELLA TRASMITTANZA TERMICA U DELLE STRUTTURE OPACHE ORIZZONTALI DI PAVIMENTO			
ZONA CLIMATICA	DAL 1/1/2006 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2008 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2010 [W/(m ² .K)]
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

VALORI DELLA TRASMITTANZA TERMICA U DELLE STRUTTURE TRASPARENTI COMPRENSIVE DEGLI INFISSI			
ZONA CLIMATICA	DAL 1/1/2006 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2008 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2010 [W/(m ² .K)]
A	5,50	5,00	4,60
B	4,00	3,60	3,00
C	3,30	3,00	2,60
D	3,10	2,80	2,40
E	2,80	2,40	2,20
F	2,40	2,20	2,00

VALORI DELLA TRASMITTANZA TERMICA U DELLE STRUTTURE TRASPARENTI COMPRENSIVE DEGLI INFISSI			
ZONA CLIMATICA	DAL 1/1/2006 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2008 [W/(m ² .K)]	DAL 1/1/2010 [W/(m ² .K)]
A	5,00	4,50	3,70
B	4,00	3,40	2,70
C	3,00	2,30	2,10
D	2,60	2,10	1,90
E	2,40	1,90	1,70
F	2,30	1,70	1,30

Una volta eseguita una preliminare valutazione speditiva dello stato prestazionale, il progetto di riqualificazione energetica deve imprescindibilmente riferirsi a una analisi approfondita dello stato di fatto, al fine di individuarne i valori principali e, di conseguenza, gli obiettivi prefissati dagli interventi per portare l'edificio da una classe energetica a una di livello superiore.

Questa valutazione deve essere fatta sulla base di misurazioni in situ delle variabili coinvolte nel processo, come punto di partenza per lo svolgimento di calcoli e simulazioni mediante software specifici, scelti opportunamente, suddivisi principalmente in due differenti categorie:

- software che operano in **regime stazionario**⁴⁴;
- software che operano in **regime dinamico**⁴⁵.

In particolare, la valutazione del comportamento energetico nel clima mediterraneo, che caratterizza anche la regione Emilia Romagna, comporta notevoli complessità, in quanto le condizioni climatiche esterne e i fenomeni in gioco risultano variabili nel tempo, portando così alla necessità di studiare l'edificio con modelli di analisi in regime dinamico. Infatti, la rilevante escursione termica esterna e la considerevole variazione di irraggiamento solare nel corso della giornata determinano sollecitazioni variabili sull'involucro edilizio, che possono essere considerate solo riferendosi a intervalli di tempo molto ristretti, fino a rilevazioni per frazioni di ore.

Mediante questo regime di analisi dinamico è possibile valutare gli effetti dovuti alla non stazionarietà del fenomeno della trasmissione del calore attraverso le chiusure, con le conseguenti ripercussioni sulle condizioni interne dell'edificio. In regime dinamico, quindi, il flusso termico per trasmissione attraverso le chiusure opache tiene conto anche della differenza di temperatura tra interno ed esterno. Questi aspetti non possono invece essere valutati se si effettuano analisi in regime stazionario, basate su dati climatici aggregati, che considerano la trasmittanza U [W/m²K] come unico indicatore delle proprietà della chiusura, nell'ipotesi semplificata di una trasmissione istantanea del calore da un lato e all'altro della parete.

Per lo svolgimento di una analisi energetica in regime dinamico sui modelli dei fabbricati oggetto di studio, occorre in primo luogo elaborare un modello geometrico dettagliato dell'edificio: ciò è possibile grazie ai dati raccolti durante le approfondite ricerche di archivio e le attività

⁴⁴ Le simulazioni effettuate in regime stazionario consentono di indagare solo parzialmente le reali prestazioni di un edificio: esse si fondano sull'assunto che la variazione periodica (oraria e giornaliera) delle temperature e della radiazione solare possa essere trascurata, e dunque richiedono di conoscere dati climatici molto aggregati, che nella migliore delle ipotesi sono rappresentati dalle medie mensili di temperatura e irraggiamento. I software più o meno noti, tra cui *Edilclima*, *EcoAbita*, *CasaClima*, *EcoDomus*, *Docet*, *Docet Pro* ed *Ecocasa*, *PHPP* (*Passive House Planning Package*), *MC4 Suite*, operano tutti quanti in regime stazionario, pur differenziandosi tra di loro in relazione alle semplificazioni che apportano i diversi algoritmi di calcolo.

⁴⁵ Le simulazioni effettuate in regime dinamico, invece, permettono invece un'analisi molto più realistica e completa, e in particolare valutano in dettaglio i contributi apportati dall'inerzia termica dell'involucro e dalla ventilazione naturale, che hanno ripercussioni sia sulle prestazioni termiche in regime invernale, sia in quello estivo. I software più noti in questo ambito, tra cui *TRNSYS*, *IES*, *Esp-r*, *DesignBuilder+EnergyPlus*, vengono utilizzati tutti per lo svolgimento delle analisi in regime dinamico.

di sopralluogo che, insieme alle informazioni relative al luogo e alle caratteristiche tecniche degli elementi, portano a una analisi energetica valida, in termini qualitativi e quantitativi.

Di seguito, coerentemente con quanto appena rilevato sulle modalità di analisi energetica, in relazione alle principali problematiche caratterizzanti il patrimonio edilizio recente, si espongono i fattori più significativi per la definizione del comportamento energetico delle scuole oggetto di studio. Ai fini di una migliore comprensione di quanto esposto, si riporta un esempio di analisi energetica svolta su un edificio campione selezionato tra le ex Scuole Medie prefabbricate di Bologna.

SUPERFICI DI INVOLUCRO OPACHE E TRASPARENTI

Sulla base dei dati raccolti sul campo, è possibile acquisire tutti i valori numerici relativi ai principali fattori che influiscono sul comportamento energetico degli edifici scolastici studiati. Come dimostrano i risultati ottenuti dalle analisi condotte sugli edifici scolastici analizzati⁴⁶, in generale le scuole presentano valori elevati delle trasmittanze U . Si evidenzia così la scarsa efficienza energetica degli edifici scolastici moderni che presentano lo schema tipo adottato dal Comune di Bologna, prevalentemente basato sull'impiego di tecniche di prefabbricazione. Infatti, i valori delle trasmittanze degli elementi di chiusura esterna (pareti e coperture), prevalentemente costituiti da pannelli prefabbricati in cemento armato, debolmente isolati da un sottile strato di isolante termico, così come i valori relativi ai sistemi di apertura (porte e finestre), si discostano molto da quelli richiesti dalla normativa, esposti nelle tabelle riportate sopra.

Inoltre, la tipologia costruttiva caratterizzata da strutture portanti prevalentemente prefabbricate e assemblate in opera, e da tamponamenti in pannelli prefabbricati presenta inevitabilmente notevoli problematiche legate ai ponti termici, in corrispondenza dei punti di connessione, dei punti critici di discontinuità, e di collegamento con le finestrature che, in corrispondenza sia dei vetri che dei serramenti metallici, presentano un livello insufficiente di isolamento termico.

Le scuole realizzate durante gli anni Sessanta e Settanta, dotate di estese superfici vetrate predisposte per ottenere un elevato livello di illuminazione naturale, presentano inevitabilmente notevoli carenze dal punto di vista del comfort igrotermico. Durante l'inverno, in corrispondenza delle ampie vetrate costituite da vetri singoli, intelaiati all'interno di infissi di ferro, si creano dei significativi punti di dispersione del calore, oltre che degli importanti ponti termici che interrompono la continuità dell'involucro edilizio, aggravandone ulteriormente le capacità performanti. Viceversa, durante l'estate, gli ambienti interni posti in corrispondenza delle vetrate, in assenza di opportuni sistemi di oscuramento, sono soggetti a una notevole esposizione alla radiazione solare, che viene assorbita e trasformata sotto forma di calore accumulato dall'edificio.

⁴⁶ Si vedano di seguito i risultati relativi alla analisi energetica in regime dinamico svolta sull'I.C. n.1 "Dozza", riportata a titolo di esempio per illustrare il modello geometrico realizzato con *EnergyPlus* e *DesignBuilder*.

SISTEMA IMPIANTISTICO

Durante la fase di progettazione delle scuole realizzate negli anni Settanta, tra i vari criteri progettazione, si attribuisce grande importanza al problema del ricambio dell'aria, per favorire una crescita sana ed equilibrata dei ragazzi.

A questo fine, gli impianti previsti da progetto originario in ogni aula delle scuole elementari e medie sono stati provvisti di una presa d'aria esterna, sistemi di filtrazioni e riscaldamento ed espulsione dell'aria viziata, regolati da un termostato, per una gestione più economica del consumo energetico del fabbricato. Questi impianti, con il solo corredo della regolazione automatica in centrale, consentivano di mantenere una temperatura interna attorno ai 20 °C con umidità attorno al 50%, con tolleranze accettabili e senza spreco di combustibile e di personale: l'automazione delle centrali e la scelta del fluido termovettore (acqua calda, anziché vapore) consentiva infatti il regolamento automatico della temperatura, senza necessitare più della presenza continua di un fuochista. Per questa ragione, le centrali termiche non venivano più interrare sotto gli edifici, bensì collocate in un blocco separato dall'edificio principale.

Una scelta qualificante viene presa dall'Amministrazione alla fine degli anni Sessanta, decidendo di alimentare tutte le nuove centrali con gas metano, ossia con un combustibile che, a differenza degli altri precedentemente usati, non fosse inquinante. Con questo tipo di combustibile la conduzione risulta più facile, più pulita, e notevolmente più economica, eliminando al contempo i problemi e gli oneri legati allo stoccaggio, al rifornimento, ai controlli e agli appalti⁴⁷.

Nonostante al momento della realizzazione delle scuole sia stata attribuita grande attenzione all'aspetto impiantistico, col passare degli anni non sono stati svolti i dovuti interventi di manutenzione degli impianti meccanici, idrosanitari e, soprattutto, termici. Molte scuole presentano attualmente caldaie vetuste, caratterizzate da rendimento di produzione ridotto e tecnologie obsolete, che necessitano di interventi di manutenzione o sostituzione. L'assenza di opportuni programmi di manutenzione e gestione corretta del patrimonio pubblico scolastico da parte degli Enti gestori, unita alla carenza di finanziamenti per il loro svolgimento, ha portato progressivamente a una situazione più o meno critica dal punto di vista impiantistico.

In particolare, sulla base delle ricerche svolte e dei dati raccolti direttamente presso gli Enti preposti⁴⁸, si rilevano spesso situazioni in cui il sistema impiantistico termico presenta importanti

⁴⁷ Nella stagione 1973-1974, mentre in molte città di Italia tante scuole rimasero senza combustibile, il metano a Bologna non ha mai impedito il corretto funzionamento dell'impianto di riscaldamento. (Bottino P., *Condizioni climatiche e igieniche dell'ambiente*, in Aa. Vv., "Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975", Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975, p. 81.)

⁴⁸ Il Comune di Bologna ha messo a disposizione della ricerca le schede di diagnosi redatte per tutti gli edifici scolastici pubblici di sua gestione (Materne, Elementari, Medie), svolte nel 2009 da parte di *Sinergia Sistemi S.p.a.* (Casalecchio di Reno, Bologna), in collaborazione con *BGP - Bologna Gestione Patrimonio Soc.Cons. a r.l.* Queste schede sono state impiegate per la verifica dei parametri considerati per le scuole analizzate dal presente lavoro di Tesi.

carenze prestazionali durante il periodo invernale, favorendo situazioni di disagio termoigrometrico inadeguate per lo svolgimento delle normali attività didattiche.

Al contempo, durante il periodo estivo, l'assenza di impianti di condizionamento per il raffrescamento degli ambienti interni, unita alla mancanza di dispositivi di ombreggiamento e protezione dalla radiazione solare, porta a situazioni di eccessivo accumulo di calore e dunque di disagio termico.

AMBIENTE CIRCOSTANTE E VERDE

Secondo gli elaborati originali di progetto, raccolti tramite le ricerche bibliografiche e archivistiche, la grande maggioranza delle nuove scuole realizzate durante gli anni Settanta è stata progettata appositamente in aree inserite all'interno di ampie zone verdi, al fine di garantire un ambiente idoneo e salubre per lo sviluppo dei ragazzi.

Al contempo, il verde veniva usato anche come elemento di mitigazione acustica, al fine di garantire un buon livello di isolamento acustico: il controllo della rumorosità veniva svolto anche tramite l'adozione di speciali trattamenti fonoassorbenti realizzati in tutte le aule, volti alla diminuzione dei tempi di riverberazione del suono, a compensare il problema dell'inquinamento acustico legato all'uso di aperture ampie con comunicazioni frequenti.

Nonostante durante la fase di progetto della maggior parte di questi edifici scolastici sia stata prestata attenzione al fattore ambientale, attualmente la situazione si è spesso evoluta, dando origine a situazioni carenti dal punto di vista della vegetazione.

Uno dei primi fattori da considerare in ambito di analisi del comportamento energetico degli edifici riguarda proprio l'analisi dell'ombreggiamento delle facciate, al fine di individuare il livello di esposizione alla radiazione solare, in funzione dell'orientamento e della schermatura per opera di alberi o altri elementi di vegetazione.

In generale, una corretta e sostenibile progettazione del verde come elemento di mitigazione climatica prevede la disposizione di prati erbosi che, al contrario delle pavimentazioni in asfalto, non aumentino la temperatura dell'ambiente circostante, affiancata da una corretta disposizione di alberature caducifoglie, che durante il periodo estivo schermano la radiazione solare, mentre durante il periodo invernale favoriscano l'esposizione e dunque l'accumulo di calore.

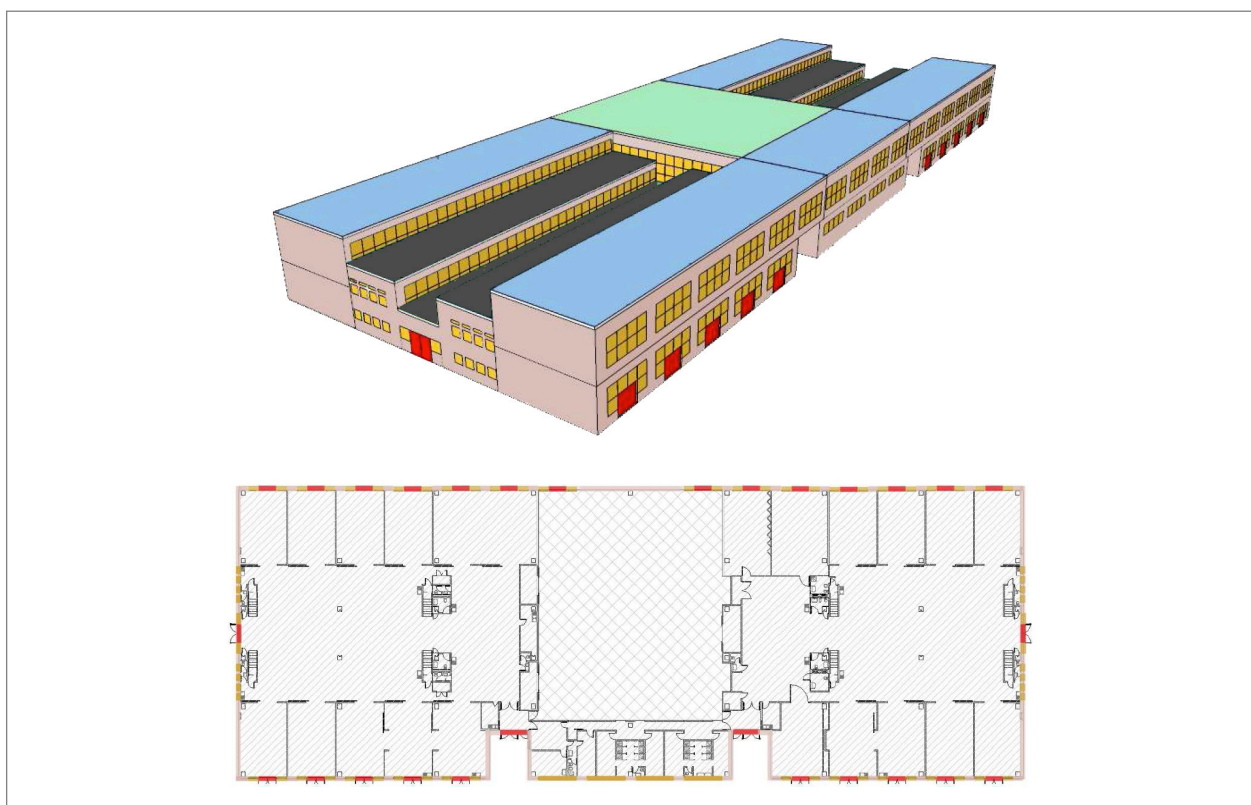
Dal punto di vista climatico, infatti, occorre prestare grande attenzione al differente comportamento energetico in relazione all'orientamento della facciate di uno stesso edificio:

- il fronte **nord**, mai direttamente irradiato, presenta maggiormente il problema della dispersione termica, necessitando dunque di un adeguato isolamento termico dell'involucro edilizio;
- il fronte **est** è caratterizzato da guadagni solari termici scarsi durante l'inverno, presentando comunque il problema di forte radiazione solare verso le ore 11 del mattino, necessitando

così della presenza di dispositivi di schermatura verticale;

- il fronte **sud**, maggiormente esposto al sole, presenta il problema della radiazione solare diretta durante il periodo estivo, facendo avvertire così l'esigenza di sistemi orizzontali di schermatura solare in corrispondenza delle finestrate;
- il fronte **ovest** rappresenta la facciata maggiormente problematica dal punto di vista del controllo climatico, in quanto difficile da schermare senza provocare al contempo un ombreggiamento delle superfici trasparenti. Generalmente, per questo fronte, è buona norma limitare al massimo le aperture, preferendo in ogni caso le finestre verticali rispetto a quelle a nastro (principalmente utilizzate negli edifici scolastici prefabbricati), poiché più facili da schermare con frangisole verticali.

Tra i sistemi di mitigazione ambientale basati sull'impiego di vegetazione, può essere molto importante la disposizione di alberature caducifoglie in corrispondenza delle facciate criticamente esposte all'irraggiamento solare, in particolare per il fronte ovest dell'edificio. Spesso, i sopralluoghi svolti in situ hanno portato a riscontrare la totale o parziale assenza di alberature utilizzate per questi fini, con inevitabili conseguenze dal punto di vista dell'ombreggiamento e dunque del controllo del microclima interno.



PARETI ESTERNE	s [cm]	λ [W/mK]	U [W/m²K]
Pannello cemento	9,0	1,13	0,786
Isolante EPS	3,0	0,04	
Pannello cemento	9,0	1,13	

SOLAIO PIANO TERRA SCUOLA	s [cm]	λ [W/mK]	U [W/m²K]
Paviment. piastrelle	1,0	1,30	1,463
Massetto	8,0	0,41	
Solaio latero-cemento	16,0	0,62	
Sottofondo cemento	5,0	1,35	

SOLAIO PIANO TERRA PALESTRA	s [cm]	λ [W/mK]	U [W/m²K]
Paviment. linoleum	1,0	0,17	1,463
Massetto	8,0	0,41	
Solaio latero-cemento	16,0	0,62	
Sottofondo cemento	5,0	1,35	

FINESTRE	U [W/m²K]
Doppio vetro da 0,6 cm	4,440

PORTE	U [W/m²K]
Lamiera in acciaio	3,843

COPERTURA SCUOLA	s [cm]	λ [W/mK]	U [W/m²K]
Guaina impermeab.	1,7	1,00	0,664
Massetto	7,0	0,41	
Isolante lana roccia	4,0	0,04	
Tegolo c.a. prefabbr.	8,0	1,13	

COPERTURA PALESTRA	s [cm]	λ [W/mK]	U [W/m²K]
Lamiera in acciaio	1,0	-	0,776
Guaina impermeab.	1,7	1,00	
Massetto	7,0	0,41	
Isolante lana roccia	4,0	0,04	
Tegolo c.a. prefabbr.	8,0	1,13	

TERRAZZA	s [cm]	λ [W/mK]	U [W/m²K]
Paviment. piastrelle	1,7	1,00	0,776
Guaina impermeab.	7,0	1,00	
Massetto	4,0	0,41	
Isolante lana roccia	8,0	0,04	
Tegolo c.a. prefabbr.	8,0	1,13	

[Fig. 97] Analisi termiche e calcolo delle trasmittanze delle superfici di involucro (legenda di riferimento in prospettiva e in pianta) in funzione delle specifiche stratigrafie, della Scuola Media "Dozza" (Quartiere Reno, Bologna).

ANALISI ENERGETICA DEL CASO DI STUDIO: ISTITUTO COMPRENSIVO N.1 “DOZZA” (BOLOGNA)

A titolo esemplificativo dell’approccio proposto nel presente capitolo, si riportano i tratti essenziali dell’analisi energetica svolta sull’I.C. n.1 “Dozza”, svolta seguendo il metodo di calcolo dinamico, attraverso l’impiego di software operanti in regime dinamico.

Il progetto si avvale del software di simulazione energetica in regime dinamico *DesignBuilder*, che costituisce l’interfaccia grafica del software *EnergyPlus*, consentendone dunque il disegno e la riproduzione grafica del modello dell’edificio, completo di assegnazione dei materiali, e dunque delle proprietà fisiche e termiche dei componenti edili. Grazie all’utilizzo del software *EnergyPlus* per la simulazione termica del sistema edificio-impianto, basato sullo studio del modello geometrico realizzato preliminarmente, si ottengono come dati di output i consumi energetici, le temperature, le trasmittanze e i flussi termici di un edificio.

Infatti, nello specifico, l’obiettivo del calcolo dinamico consiste nello studio del reale comportamento termico ed energetico di un edificio, al fine di determinare il fabbisogno di energia mediante metodi dettagliati di simulazione con passi temporali riferiti all’ora (a differenza del calcolo stazionario che esegue una media annuale/mensile). Le valutazioni possono riguardare riscaldamento, raffrescamento, deumidificazione, illuminazione e tutte le attività e i consumi attinenti all’edificio, con lo scopo di ottimizzare l’azione di impianti e apparecchiature, basata sulla richiesta degli occupanti reali.

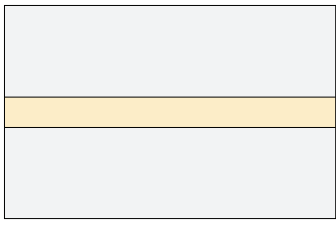
In definitiva, si può dire che il calcolo dinamico riesce a simulare il comportamento reale dell’edificio in maniera più approfondita rispetto al calcolo stazionario, comunemente utilizzato per la certificazione energetica. Tuttavia, è importante rilevare che la presenza di innumerevoli variabili rende complessa la valutazione prestazionale degli edifici e il confronto tra il consumo energetico reale e quello calcolato. Tali variabili dipendono dalla geometria dell’edificio e dai materiali, dal clima locale e dalle variazioni stagionali, dalle abitudini degli utenti, dal consumo di acqua calda, dall’uso di illuminazione, dunque da una serie di variabili difficilmente comparabili e standardizzabili.

Le analisi svolte si basano sul comportamento reale dell’edificio e tengono in considerazione sia le variazioni di temperatura giornaliere (simulazioni orarie), sia l’utilizzo effettivo della struttura, l’occupazione, le dispersioni, e altri fattori coinvolti. I risultati ottenuti, confrontati con i dati forniti dall’Ente gestore del patrimonio edilizio scolastico, possono essere considerati dotati di un buon grado di precisione, grazie alla molteplicità delle variabili considerate.

Per procedere all’analisi energetica dello stato di fatto del fabbricato oggetto di intervento mediante *DesignBuilder* occorre in prima istanza realizzare il modello tridimensionale dettagliato dell’edificio, associando ad ogni superficie (verticale e orizzontale) la tipologia del pacchetto costruttivo o del materiale ad esso riferito [Fig. 97].

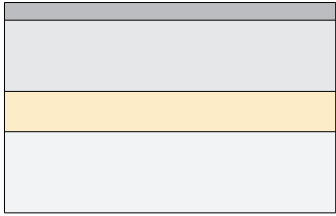
Una volta inserite le differenti stratigrafie, il software calcola per ognuna di esse il valore della resistenza termica R [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$], della trasmittanza stazionaria U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] e della capacità termica interna C_t [$\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$]. Di seguito vengono riportati nel dettaglio i parametri calcolati da *DesignBuilder* per ognuno dei pacchetti costruttivi appartenenti alle partizioni verticali esterne e orizzontali interne ed esterne.

PARETE ESTERNA A PANNELLI PREFABBRICATI IN C.A.

		SPESORE [cm]	λ [W/mK]
Cemento	9,00	1,13	
Isolante in EPS	3,00	0,04	
Cemento	9,00	1,13	

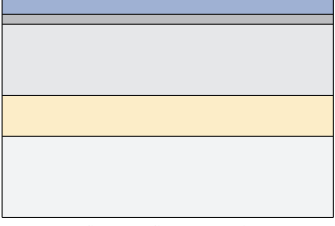
SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	2,152
Coefficiente radiativo di scambio di calore [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	5,540
Resistenza di superficie [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	0,130
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	5,130
Resistenza di superficie [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	0,040
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	0,907
Valore R [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	1,273
Valore U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	0,786
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - C_t [$\text{kJ}/\text{m}^2\text{K}$]	126,2100
Limite di resistenza superiore [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	1,273
Limite di resistenza inferiore [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	1,273
Valore U superficie su superficie [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	0,907
Valore R [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	1,273
Valore U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	0,786

COPERTURA DELLA SCUOLA

		SPESORE [cm]	λ [W/mK]
	Guaina impermeabilizzante	1,70	1,00
	Massetto in cls	7,00	0,41
	Isolante in fibra di legno	4,00	0,04
	Tegolo in c.a. prefabbricato	8,00	1,13

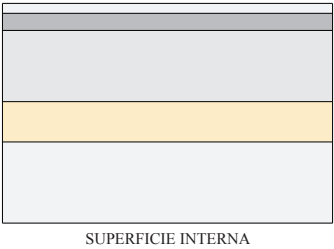
SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,540
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,100
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,130
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,040
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	0,732
Valore R [m ² K/W]	1,506
Valore U [W/m²K]	0,664
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - Ct [KJ/m ² K]	191,9800
Limite di resistenza superiore [m ² K/W]	1,506
Limite di resistenza inferiore [m ² K/W]	1,506
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	0,732
Valore R [m ² K/W]	1,506
Valore U [W/m²K]	0,664

TERRAZZA SUPERIORE E INFERIORE

		SPESORE [cm]	λ [W/mK]
	Pavimentazione in piastrelle	1,70	1,00
	Guaina impermeabilizzante	1,00	1,00
	Massetto in cls	7,00	0,41
	Isolante in fibra di legno	4,00	0,04
	Tegolo in c.a. prefabbricato	8,00	1,13

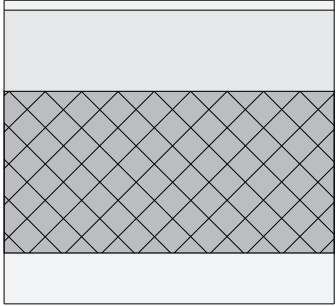
SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,540
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,100
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,130
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,040
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	0,870
Valore R [m ² K/W]	1,289
Valore U [W/m²K]	0,776
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - Ct [KJ/m ² K]	191,9800
Limite di resistenza superiore [m ² K/W]	1,289
Limite di resistenza inferiore [m ² K/W]	1,289
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	0,870
Valore R [m ² K/W]	1,289
Valore U [W/m²K]	0,776

COPERTURA DELLA PALESTRA

		SPESORE [cm]	λ [W/mK]
	Lamiera in acciaio	1,00	-
	Guaina impermeabilizzante	1,00	1,00
	Massetto in cls	7,00	0,41
	Isolante in fibra di legno	4,00	0,04
	Tegolo in c.a. prefabbricato	8,00	1,13

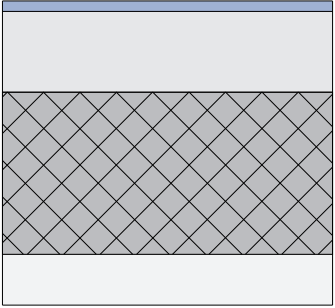
SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	4,460
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,540
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,100
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	23,290
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	1,710
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,040
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	0,713
Valore R [m ² K/W]	1,542
Valore U [W/m²K]	0,648
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - Ct [KJ/m ² K]	167,9800
Limite di resistenza superiore [m ² K/W]	1,542
Limite di resistenza inferiore [m ² K/W]	1,542
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	0,713
Valore R [m ² K/W]	1,542
Valore U [W/m²K]	0,648

SOLAIO PIANO TERRA DELLA SCUOLA

		SPESORE [cm]	λ [W/mK]
	Pavimentazione in piastrelle	1,00	1,30
	Massetto in cls	8,00	0,41
	Solaio in latero-cemento	16,00	0,62
	Sottofondo in cemento magro	5,00	1,35

SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	0,342
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,540
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,170
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,130
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,040
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	2,112
Valore R [m ² K/W]	0,684
Valore U [W/m²K]	1,463
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - Ct [KJ/m ² K]	117,0800
Limite di resistenza superiore [m ² K/W]	0,684
Limite di resistenza inferiore [m ² K/W]	0,684
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	2,112
Valore R [m ² K/W]	0,684
Valore U [W/m²K]	1,463

SOLAIO PIANO TERRA DELLA PALESTRA

		
	SPESORE [cm]	λ [W/mK]
	Pavimentazione in linoleum	1,00 0,17
	Massetto in cls	8,00 0,41
	Solaio in latero-cemento	16,00 0,62
	Sottofondo in cemento magro	5,00 1,35

SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	0,342
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,540
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,170
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	19,870
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	5,130
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,040
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	1,906
Valore R [m ² K/W]	0,735
Valore U [W/m²K]	1,361
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - Ct [KJ/m ² K]	114,5600
Limite di resistenza superiore [m ² K/W]	0,735
Limite di resistenza inferiore [m ² K/W]	0,735
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	1,906
Valore R [m ² K/W]	0,735
Valore U [W/m²K]	1,361

PORTE

Telaio in ferro verniciato

SUPERFICIE PIÙ INTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	5,846
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	1,847
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,130
SUPERFICIE PIÙ ESTERNA	
Coefficiente convettivo di scambio di calore [W/m ² K]	5,846
Coefficiente radiativo di scambio di calore [W/m ² K]	1,847
Resistenza di superficie [m ² K/W]	0,130
NESSUNO STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO	
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	5.333,333
Valore R [m ² K/W]	0,260
Valore U [W/m²K]	3,843
CON STRATO TERMICAMENTE ETEROGENEO (BS EN ISO 6946)	
Capacità termica interna - Ct [KJ/m ² K]	36,9600
Limite di resistenza superiore [m ² K/W]	0,260
Limite di resistenza inferiore [m ² K/W]	0,260
Valore U superficie su superficie [W/m ² K]	5.333,333
Valore R [m ² K/W]	0,260
Valore U [W/m²K]	3,843

FINESTRE

Doppio vetro da 0,6 cm

VALORI CALCOLATI	
Trasmissione solare totale (SHGC)	0,202
Trasmissione solare diretta	0,066
Trasmissione luce	0,08
U-value (EN 763) [W/m ² K]	4,435
Valore U [W/m ² K]	4,440

Dall'analisi dei pacchetti costruttivi che caratterizzano le partizioni interne ed esterne del fabbricato oggetto di intervento, si nota come i valori prestazionali si discostino notevolmente da quelli richiesti dalla normativa, comportando importanti carenze prestazionali energetiche nell'edificio. Inoltre, gli elevati valori delle trasmittanze termiche vengono aggravati ulteriormente dalla frequente presenza di ponti termici in corrispondenza delle discontinuità dell'involucro e delle finestrature, caratterizzate da scarso potere isolante.

Successivamente, si procede con l'analisi energetica impostando i principali dati di input necessari per eseguire la simulazione in regime dinamico, che constano nella definizione del tipo di attività che si svolgono all'interno dell'edificio e del tipo di impianti presenti.

Infine, una volta inseriti tutti i dati di input richiesti, prima di dare inizio alla simulazione occorre decidere l'arco temporale in cui si intende visualizzare e valutare il comportamento energetico dell'edificio. Tramite l'interfaccia di *DesignBuilder* è possibile scegliere l'intervallo di tempo della simulazione (annuale, mensile, orario, sub-orario) e, inoltre, impostare gli algoritmi di soluzione, gli intervalli temporali e gli output desiderati che, in generale, corrispondono ai dati del luogo, al comfort, agli apporti interni, al bilancio termico e alla ventilazione.

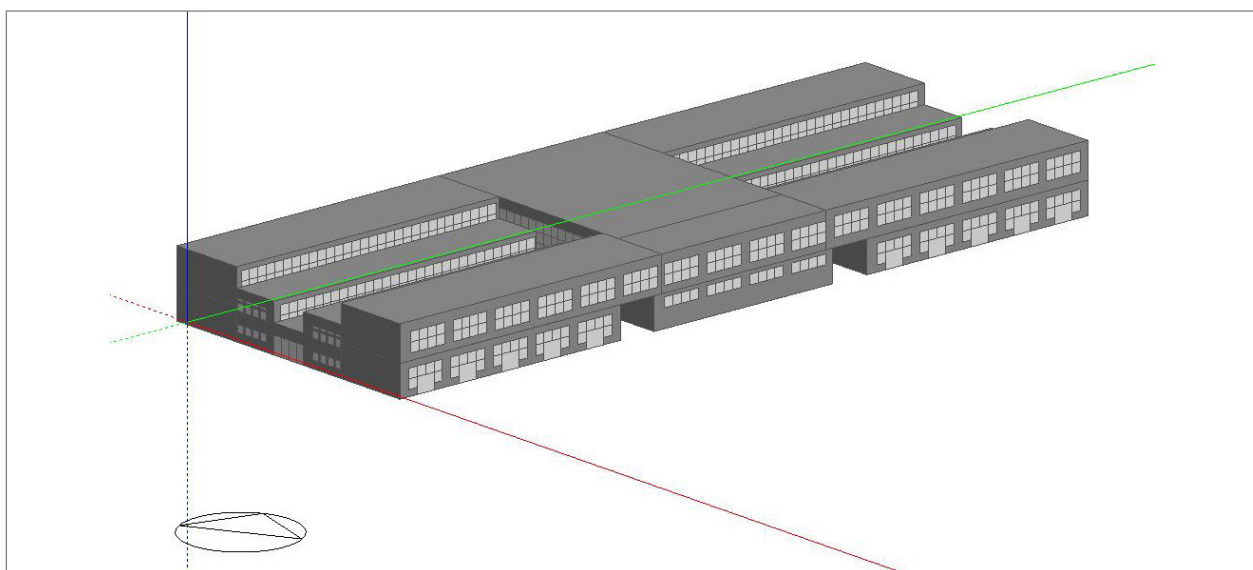
Attraverso la simulazione di tipo stazionario, si effettuano valutazioni di tipo standard, tradizionalmente usate per determinare le prestazioni energetiche all'edificio, ai fini del contenimento dei consumi energetici, oltre che per verificare il rispetto dei limiti imposti dalla normativa vigente. Le simulazioni effettuate in regime dinamico, invece, tengono conto di tutti quei parametri che variano nel tempo e che influiscono sulle prestazioni energetiche, quali le variazioni orarie del clima, degli apporti termici interni, dell'accumulo di calore nelle pareti, della radiazione solare, del comportamento degli occupanti e della ventilazione naturale. Le simulazioni in regime dinamico si basano sulla risoluzione delle equazioni termodinamiche, tenendo in conto tutti i fenomeni fisici in funzione del tempo, dunque con parametri variabili. Di conseguenza, soltanto in regime dinamico è possibile simulare il reale comportamento dell'edificio al variare di quei parametri che il calcolo tradizionale considera standard, ma che nella realtà sono variabili.

A questo proposito, occorre ricordare che il metodo proposto dalla *UNI EN ISO 13788:2013* può portare a una sovrastima del rischio di formazione di condensa interstiziale. Come viene enunciato nella norma, infatti, occorre considerare che “a causa delle molteplici fonti di errore, questo metodo risulta meno adatto per alcuni componenti edilizi e per alcuni climi” e che “trascurare il moto dell'umidità in fase liquida, in genere, dà origine a una sovrastima del rischio di condensazione interstiziale”. Il modello, infatti, opera alcune semplificazioni per rendere più agile il metodo di calcolo, nonostante queste non possano essere sempre accettabili nella realtà della progettazione. Per svolgere una corretta analisi dello sviluppo della condensa interstiziale e una adeguata valutazione della portata di tale fenomeno è necessario, dunque, tenere conto inoltre di alcuni aspetti non considerati dalla norma: la conduttività dei materiali dipende dall'umidità e nel processo di

condensazione viene ceduta una certa quantità di calore, che comporta una modifica dell'andamento delle temperature negli strati e una variazione dei valori di pressione di saturazione, portando a una quantità di acqua condensata effettiva differente da quella prevista. Viceversa, nel processo di evaporazione viene assorbita una data quantità di calore, che comporta una variazione della pressione di saturazione, portando a una quantità di acqua evaporata effettiva diversa da quella prevista.

Inoltre, occorre notare che questo metodo di simulazione energetica tiene conto esclusivamente della diffusione al vapore d'acqua e non della capillarità e della diffusione superficiale. Infine, il modello in regime variabile, oltre ai meccanismi di diffusione del vapore lungo gli strati, considera anche tutti i fenomeni igroscopici in atto, con un passo temporale non più mensile, bensì orario. La valutazione in regime variabile oraria si basa sulla *UNI EN 15026 - Prestazione termigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio. Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica*. Questo metodo alternativo nasce per affrontare l'analisi di fenomeni quali la condensazione interstiziale in regime variabile, l'influenza dell'irraggiamento e pioggia sulla migrazione del vapore, l'asciugatura delle strutture e il comportamento dell'utenza.

In conclusione, si può dire che le potenzialità offerte dal software di analisi energetica *DesignBuilder* sono notevoli, ma comportano una ricostruzione completa del quadro descrittivo dell'ambiente di simulazione nel quale agisce il metodo di calcolo. Occorre infatti inserire i seguenti parametri: dati climatici orari per un periodo significativamente lungo, comprensivo di valori di piovosità e ventosità oraria; proprietà termiche e igroscopiche dei materiali; porosità; fattore di assorbimento dell'umidità; livello di saturazione d'acqua e andamento della conduttività in funzione di umidità e temperatura.

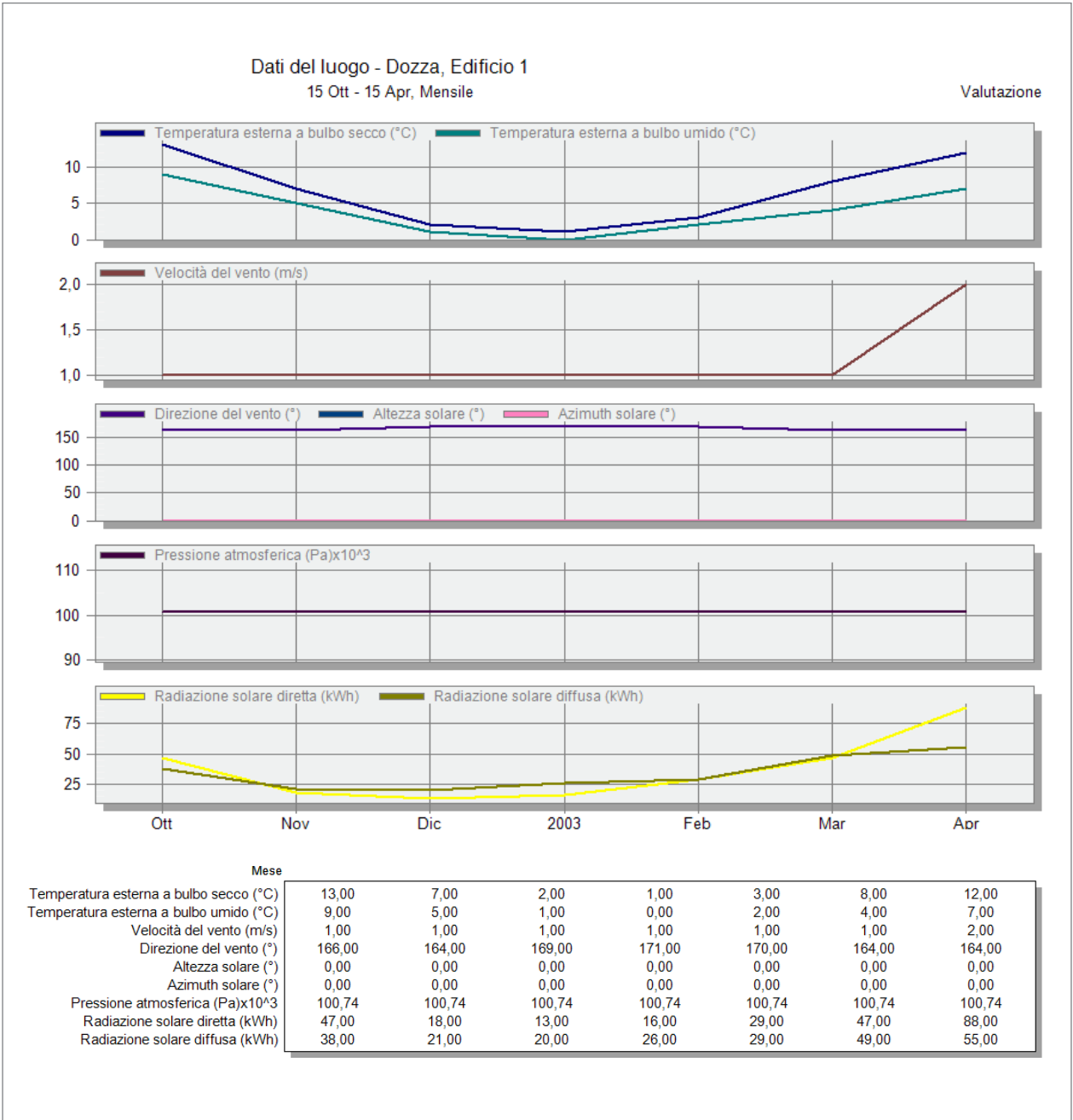


[Fig. 98] Modello tridimensionale del fabbricato oggetto di studio, realizzato con *Rhinoceros* e successivamente importato all'interno del software *DesignBuilder* per lo svolgimento delle simulazioni energetiche in regime dinamico.

Si riporta di seguito la tabella di sintesi relativa ai dati generali necessari per condurre l'analisi energetica della Scuola Media "Dozza", condotta con il software *DesignBuilder*:

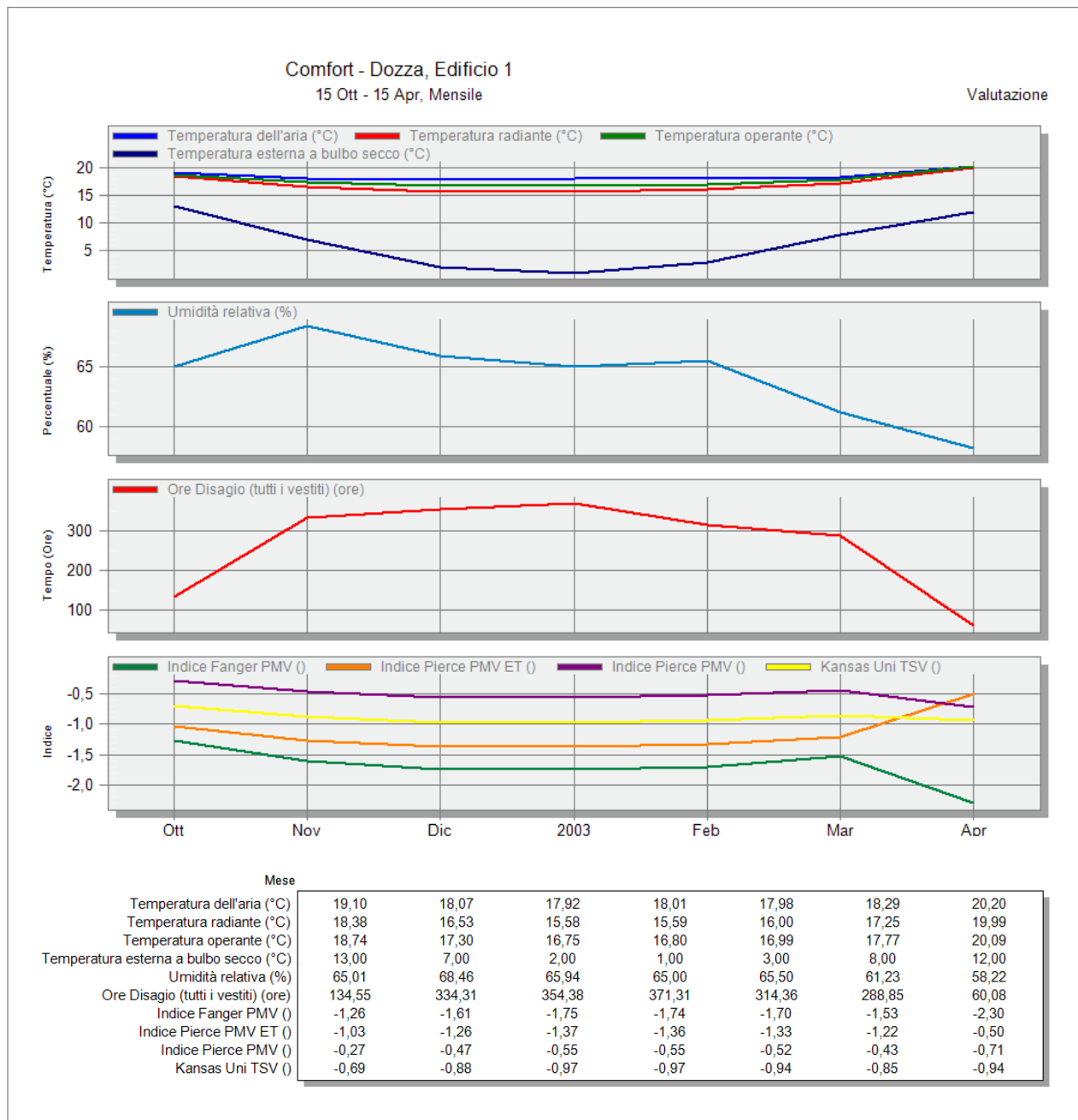
DATI GENERALI	
NOME: Scuola secondaria di primo grado (ex Scuola Media) "G. Dozza"	
INDIRIZZO: Via De Carolis, 23 - Bologna	
ANNO DI COSTRUZIONE: 1976-78	
DATI DI PROGETTO	
DATI AMBIENTALI E CLIMATICI	
Altitudine	54
Gradi giorno GG	2.259
Zona climatica	E
VENTO	
Regione di riferimento	A
Direzione prevalente	S/O
Velocità media	1,6 m/s
Velocità massima	3,2 m/s
Temperatura interna	20°C
Temperatura esterna	-5°C
CARATTERISTICHE STRUTTURALI	
Superficie	7.000 m ²
Volume lordo riscaldato	26.514 m ³
Livelli	2
Altezza media livelli	3,75 m
Rapporto di forma S/V	0,38
Rapporto di finestratura	elevato (circa 60%)
Ricambio d'aria	0,5 vol/h

La prima simulazione sul modello dell’edificio corrispondente allo stato di fatto [Fig. 98] viene effettuata durante il periodo invernale, considerando il funzionamento degli impianti nel periodo compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile. Il grafico dei “Dati del Luogo” mostra le condizioni climatiche del punto di localizzazione dell’edificio durante il periodo invernale [Fig. 99].



[Fig. 99] Simulazione energetica in regime dinamico, svolta con *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, relativa al periodo invernale compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile: scheda relativa ai grafici dei “Dati del Luogo” in cui è situata la Scuola Media Dozza.

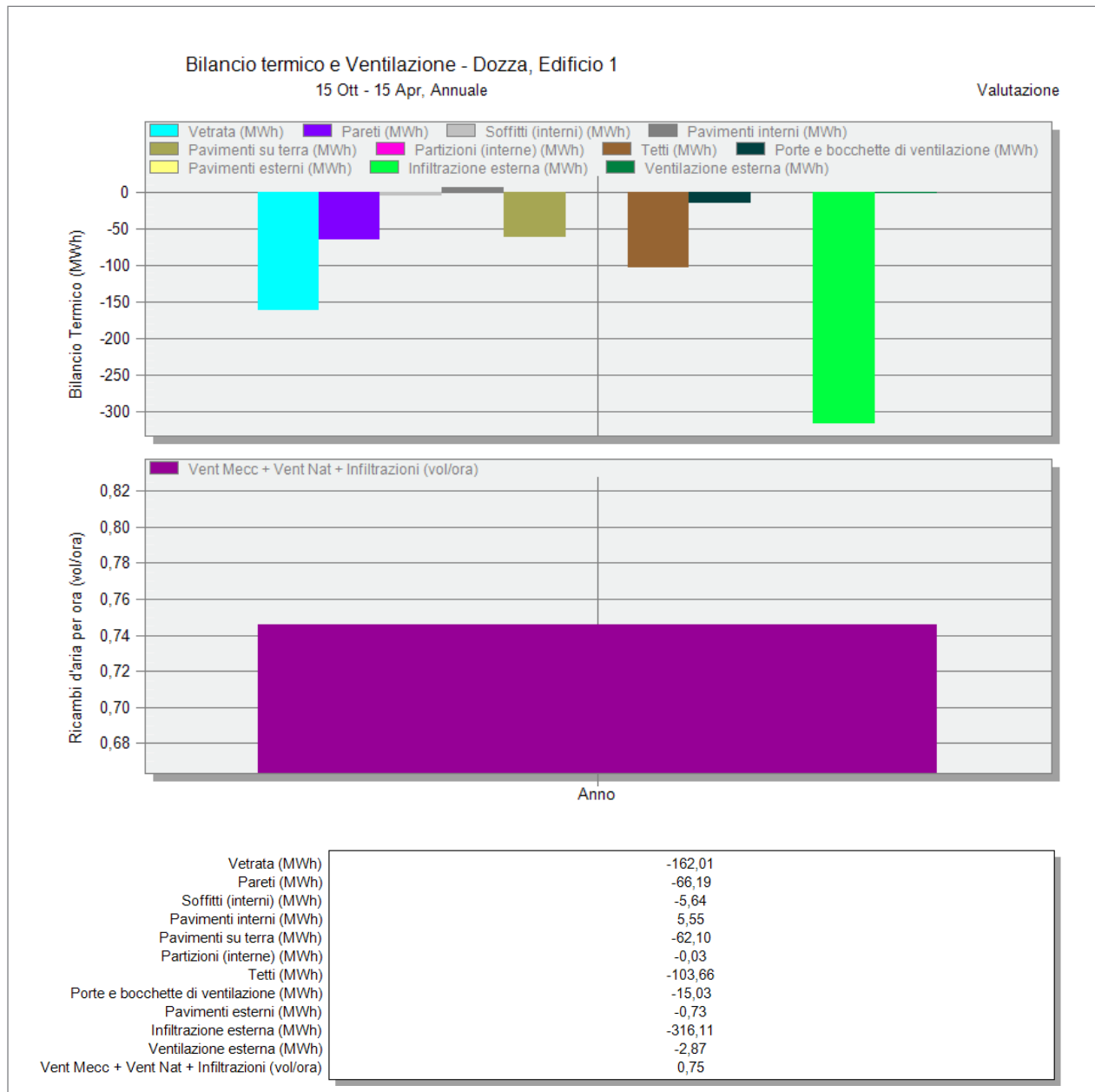
La scheda “Comfort”, invece, mostra l’andamento delle temperature dell’aria esterna, interna, radiante e operante: ai fini del raggiungimento del comfort interno, è fondamentale che la temperatura radiante e quella dell’aria non si discostino notevolmente, per cui in fase di progetto è importante valutare e intervenire su questo parametro per migliorarlo. [Fig. 100].



[Fig. 100] Simulazione energetica in regime dinamico, svolta con *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, relativa al periodo invernale compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile: scheda relativa ai grafici del “Comfort” interno alla Scuola Media Dozza.

Il grafico di “Bilancio termico e ventilazione” illustra l’andamento delle dispersioni avvenute attraverso gli elementi di involucro e quelle dovute alla ventilazione [Fig. 101].

Infine, al termine dell’analisi, è possibile estrapolare il grafico e la tabella relativi al bilancio termico, in cui si evidenziano nello specifico le dispersioni annuali attraverso l’involucro: questi dati sono utili per identificare le vulnerabilità dell’edificio e ricavarne il fabbisogno energetico annuo.



[Fig. 101] Simulazione energetica in regime dinamico, svolta con *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, relativa al periodo invernale compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile: grafici relativi al “Bilancio energetico e alla ventilazione” della Scuola Media Dozza.

DISPERSIONI E FABBISOGNO DI ENERGIA	
Dispersioni attraverso le vetrate	162.010 kWh
Dispersioni attraverso le pareti	66.190 kWh
Dispersioni attraverso i pavimenti su terra	62.100 kWh
Dispersioni attraverso coperture e terrazzi	103.660 kWh
Dispersioni per ventilazione esterna e infiltrazione	319.730 kWh
Dispersioni totali	713.690 kWh
Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale	1.089.281 kWh/anno
Fabbisogno annuo di energia termica	791.560 kWh
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	113 kWh/m ² anno
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	41 kWh/m ³ anno

In conclusione, l'analisi energetica condotta porta a rilevare la presenza di importanti dispersioni attraverso l'involucro, a causa di tre principali fattori:

- elevato rapporto di finestratura, caratterizzata da tamponamenti trasparenti poco performanti e, soprattutto, da serramenti metallici altamente permeabili;
- alti valori di trasmittanza, in corrispondenza dei tamponamenti opachi prefabbricati e dello scheletro strutturale a telaio in conglomerato cementizio armato;
- elevati valori della trasmittanza degli elementi di copertura, dovuti all'esiguo spessore dell'isolante in fibra di legno che, col passare del tempo, tende a degradarsi, schiacciandosi e riducendosi in spessore e densità.

Questi fattori, che determinano un comportamento prestazionale energetico carente durante l'inverno, comportano inevitabilmente notevoli problemi anche durante il periodo estivo. Infatti, le numerose finestre presenti sui prospetti longitudinali, esposti a sud-est e a nord-ovest, non sono dotate di alcun tipo di schermatura dalla radiazione solare, determinando un notevole innalzamento della temperatura superficiale esterna e dunque dell'ambiente interno alle aule esposte.

In definitiva, l'elevato rapporto di finestratura, pari al 60% circa delle chiusure verticali, comporta un notevole aumento delle dispersioni durante l'inverno e un surriscaldamento eccessivo durante l'estate: questo dato risulta di fondamentale importanza per la progettazione dell'intervento di riqualificazione energetica necessario per eseguire un miglioramento prestazionale dell'edificio oggetto di studio.

Pertanto, come si vedrà nel capitolo successivo, è opportuno agire sul fabbricato sia sulle porzioni opache di involucro, mediante un sistema di isolamento a cappotto in materiale isolante compatibile, sia sulle porzioni trasparenti, mediante la sostituzione di infissi e finestre maggiormente performanti e l'integrazione di dispositivi di ombreggiamento e schermatura solare.

Al fine di progettare idonei sistemi di schermatura dalla radiazione solare, in funzione della particolare destinazione d'uso dell'edificio e delle ore di svolgimento delle attività da parte dell'utenza, occorre svolgere una approfondita analisi solare che consenta di evidenziare i prospetti maggiormente esposti e le condizioni di comfort visivo e illuminazione interna all'interno delle aule, durante il ciclo giorno-notte ed estate-inverno.

Per fare questo, viene utilizzato il software di analisi ambientale e climatica *Ecotect Analysis*, che consente di importare modelli tridimensionali e di svolgerne analisi qualitative e quantitative in merito all'esposizione alla radiazione solare e alla qualità di illuminazione naturale all'interno dei locali, in funzione dell'orientamento e della geometria del fabbricato. Questo software, nato con l'obiettivo specifico di controllare gli aspetti prestazionali energetici e di fornire una analisi del contesto territoriale e climatico, consente di impostare una precisa localizzazione geografica per il modello e, successivamente, di eseguirne l'analisi solare, qualitativa e quantitativa. Dopo aver impostato la localizzazione del modello, si realizza uno studio preliminare qualitativo del modello nel suo complesso e, grazie allo strumento "Shadow Range" è possibile visualizzare la rappresentazione dell'andamento delle ombre prodotte dal modello dell'edificio oggetto di studio, considerando l'interferenza con la vegetazione e con gli edifici circostanti.

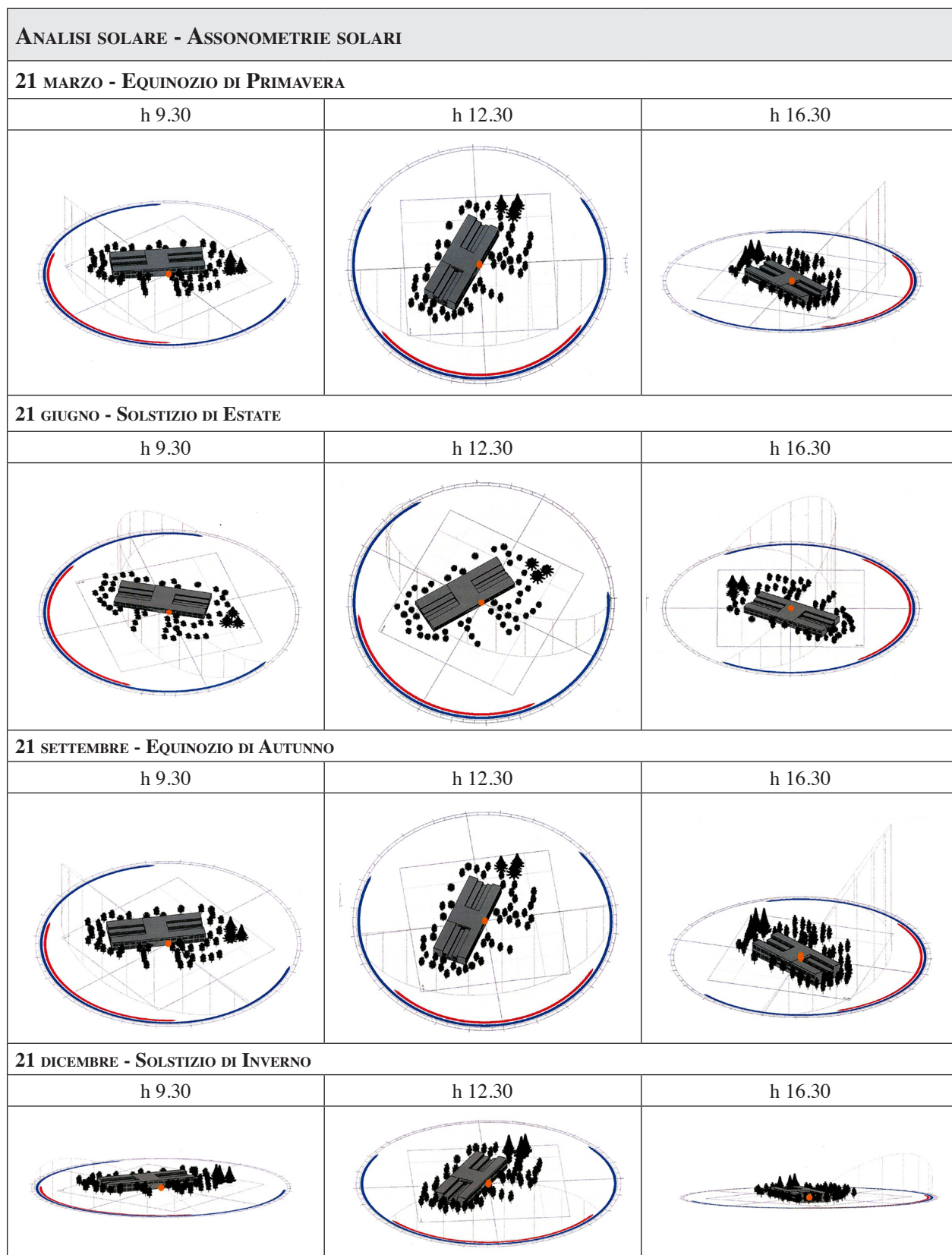
Nella pagina seguente, si riportano le immagini relative alle analisi solari svolte in questo senso con *Ecotect Analysis*, durante i quattro giorni critici dell'anno, principalmente per i prospetti longitudinali esposti a sud-est e a nord-ovest [Fig. 102].

Inoltre, il software *Ecotect Analysis* consente di visualizzare il percorso del sole in un preciso momento della giornata e di associare ad esso le ombre che il modello proietta sul contesto e viceversa. Nella tabella seguente sono raccolte le assonometrie solari elaborate in corrispondenza degli orari più significativi della giornata, in riferimento agli equinozi e ai solstizi [Fig. 103]. Ai fini di una più semplice lettura, si nota come ciò che viene mostrato dell'edificio corrisponde a ciò che risulta esposto alla radiazione solare in quel preciso momento: questi schemi risultano molto utili per determinare i prospetti in ombra e quelli esposti, per quante ore durante l'arco della giornata, consentendo così di individuare quali porzioni vetrate necessitino di una schermatura e quali, invece, possano sfruttare l'orientamento dell'edificio per proteggersi dai raggi diretti.

Infine, viene riportata in seguito una tabella riassuntiva contenente le viste significative dei fronti longitudinali nord-ovest e sud-est, con relativa proiezione delle ombre, al fine di rendere maggiormente chiara ed esaustiva l'analisi solare preliminare alla progettazione dei dispositivi di ombreggiamento [Fig. 104, 105].

ANALISI SOLARE - “SHADOW RANGE”		
	PROSPETTO NORD-OVEST	PROSPETTO SUD-EST
21 MARZO EQUINOZIO DI PRIMAVERA		
21 GIUGNO SOLSTIZIO DI ESTATE		
21 SETTEMBRE EQUINOZIO DI AUTUNNO		
21 DICEMBRE SOLSTIZIO DI INVERNO		

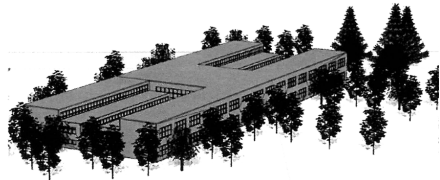
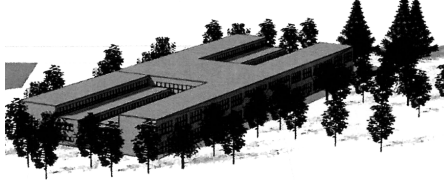
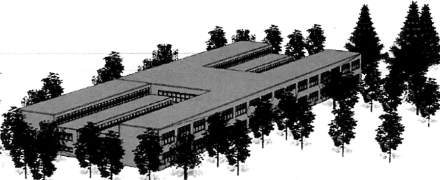

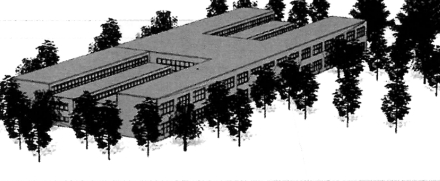
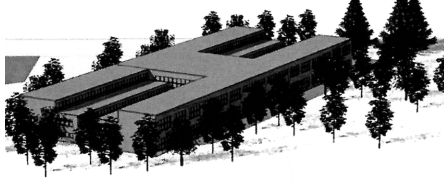
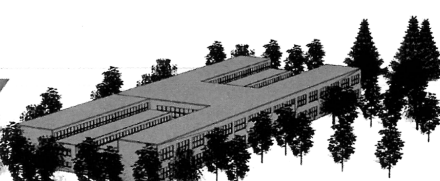

[Fig. 102] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione dello “Shadow Range” dei prospetti longitudinali nord-ovest e sud-est, durante i solstizi e gli equinozi.



[Fig. 103] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: assonometrie solari nelle ore critiche degli equinozi e solstizi.

ANALISI SOLARE - OMBREGGIAMENTI		
	PROSPETTO NORD-OVEST	
	h 12.30	h 15.30
21 MARZO EQUINOZIO DI PRIMAVERA		
21 GIUGNO SOLSTIZIO DI ESTATE		
21 SETTEMBRE EQUINOZIO DI AUTUNNO		
21 DICEMBRE SOLSTIZIO DI INVERNO		

[Fig. 104] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione degli ombreggiamenti del prospetto nord-ovest durante le ore critiche degli equinozi e solstizi.

ANALISI SOLARE - OMBREGGIAMENTI		
	PROSPETTO SUD-EST	
	h 12.30	h 15.30
21 MARZO EQUINOZIO DI PRIMAVERA		
21 GIUGNO SOLSTIZIO DI ESTATE		
21 SETTEMBRE EQUINOZIO DI AUTUNNO		
21 DICEMBRE SOLSTIZIO DI INVERNO		

[Fig. 105] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione degli ombreggiamenti del prospetto sud-est durante le ore critiche degli equinozi e solstizi.

Oltre all'analisi di tipo qualitativo per l'ambiente esterno e il contesto ambientale, *Ecotect Analysis* consente di svolgere analisi quantitative relative alla quantità di radiazione totale giornaliera, mensile o annua.

Il software consente di ottenere i valori della radiazione globale (incidente, assorbita, riflessa) che si manifesta sull'intero edificio nella media giornaliera e della radiazione totale mensile incidente sulle sole vetrate dell'edificio (calcolata a ogni ora di ogni giorno, per ogni mese dell'anno), tenendo conto della posizione geografica e delle specificità climatiche.

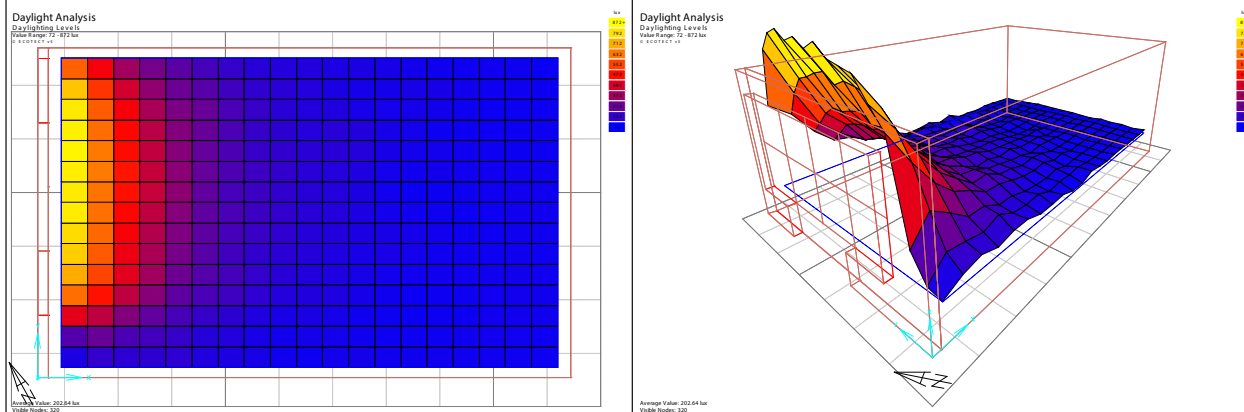
Questo parametro può essere utile durante la fase di analisi preliminare, al fine di svolgere un confronto fra lo stato di fatto e lo stato di progetto finale: il progetto dei dispositivi schermanti, infatti, passa attraverso un'analisi attenta delle condizioni di illuminazione delle singole aule, in base al loro orientamento e alla loro esposizione. Attraverso lo strumento di "Lighting Analysis", dunque, è possibile quantificare la quantità di luce solare in corrispondenza di un preciso punto di localizzazione del modello tridimensionale realizzato.

L'analisi dell'illuminazione permette di analizzare sia la luce naturale, che quella artificiale: nel caso di studio specifico dell'analisi solare della Scuola Media "Dozza", viene svolta soltanto l'analisi dell'illuminazione naturale, in quanto lo scopo consiste nella determinazione della necessità di inserire schermature solari. Operativamente, per valutare in maniera quantitativa la luce naturale che investe una determinata superficie, si associa ad essa una griglia di analisi sulla quale vengono indicati i valori del livello di illuminazione [lux].

Nel caso specifico delle Scuole Medie "Dozza", l'analisi dell'illuminazione naturale viene condotta per quattro aule, due per ogni livello, per valutare l'illuminazione per entrambi gli orientamenti nord-ovest e sud-est [Fig. 106-108].

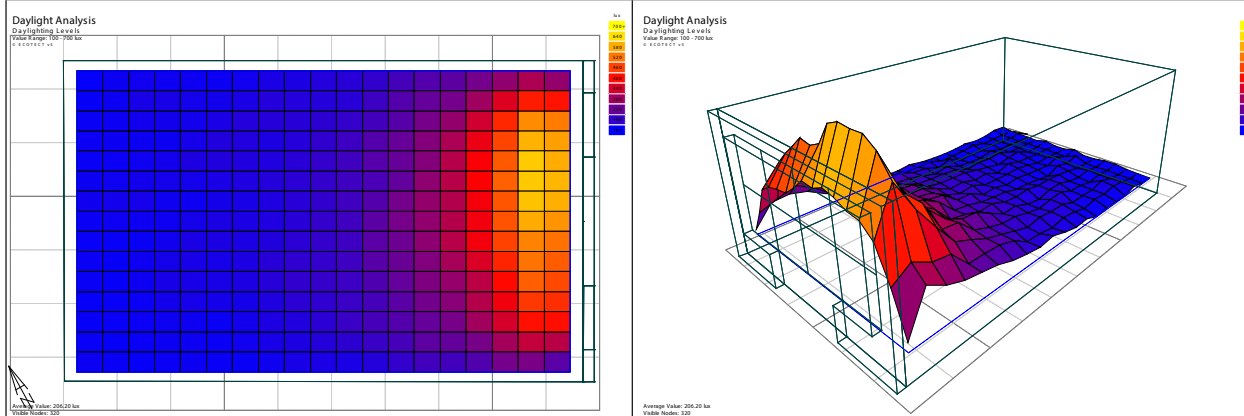
“DAYLIGHTING LEVELS” - PIANO TERRA

FRONTE NORD-OVEST

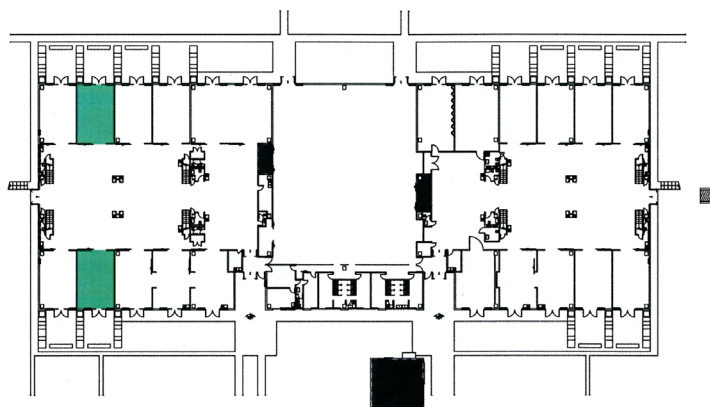


Livello di illuminazione medio: 202,64 lux

FRONTE SUD-EST



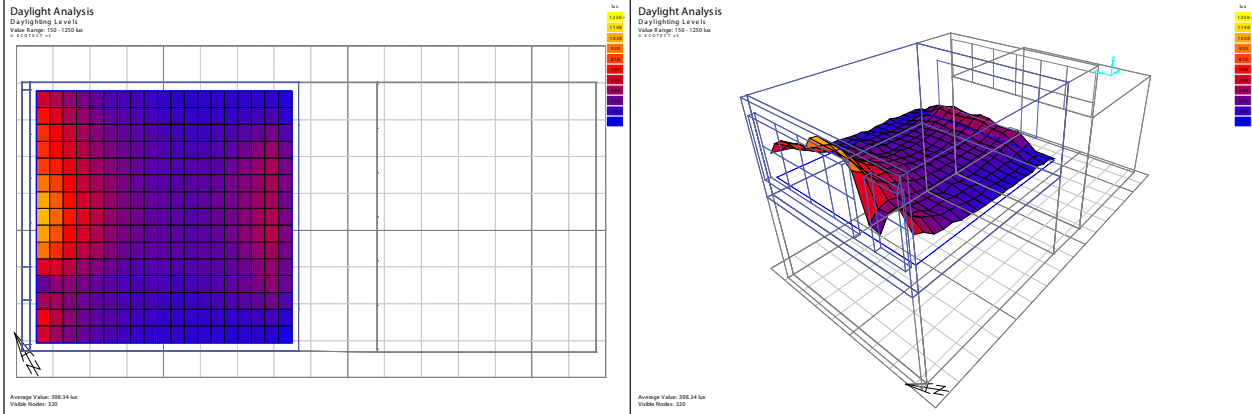
Livello di illuminazione medio: 206,20 lux



[Fig. 106] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione in pianta e in prospettiva del livello di illuminazione naturale all'interno delle aule tipo del piano terra, per l'affaccio nord-ovest e sud-est.

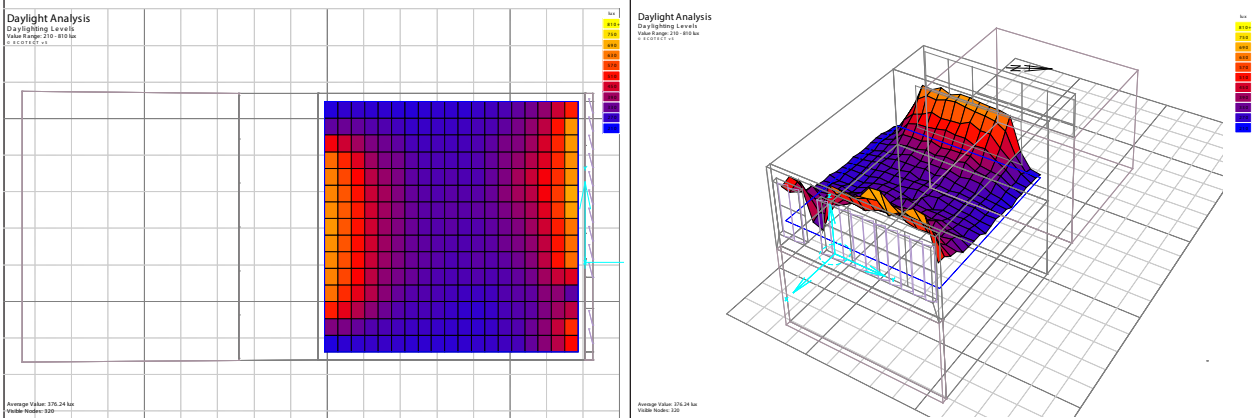
“DAYLIGHTING LEVELS” - PIANO PRIMO

FRONTE NORD-OVEST

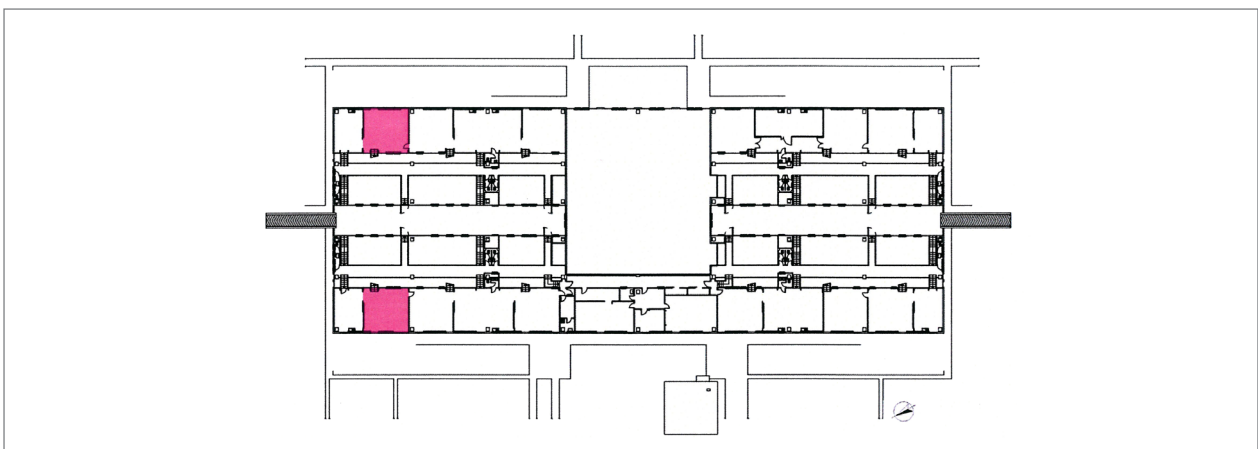


Livello di illuminazione medio: 398,34 lux

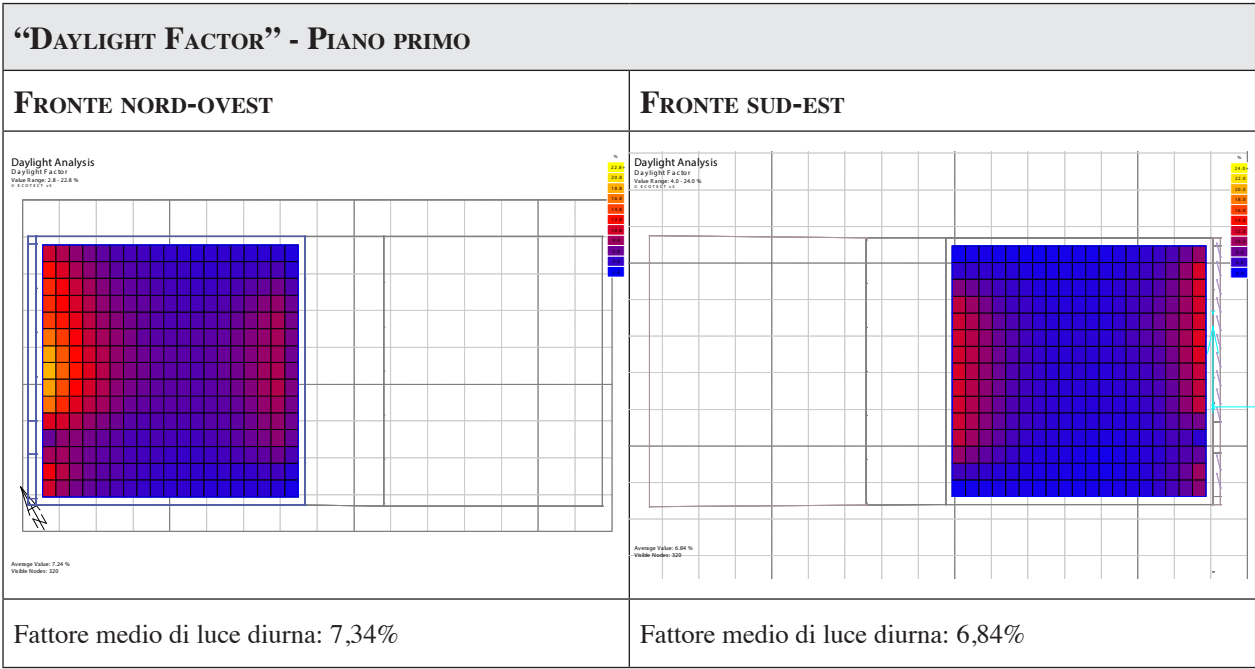
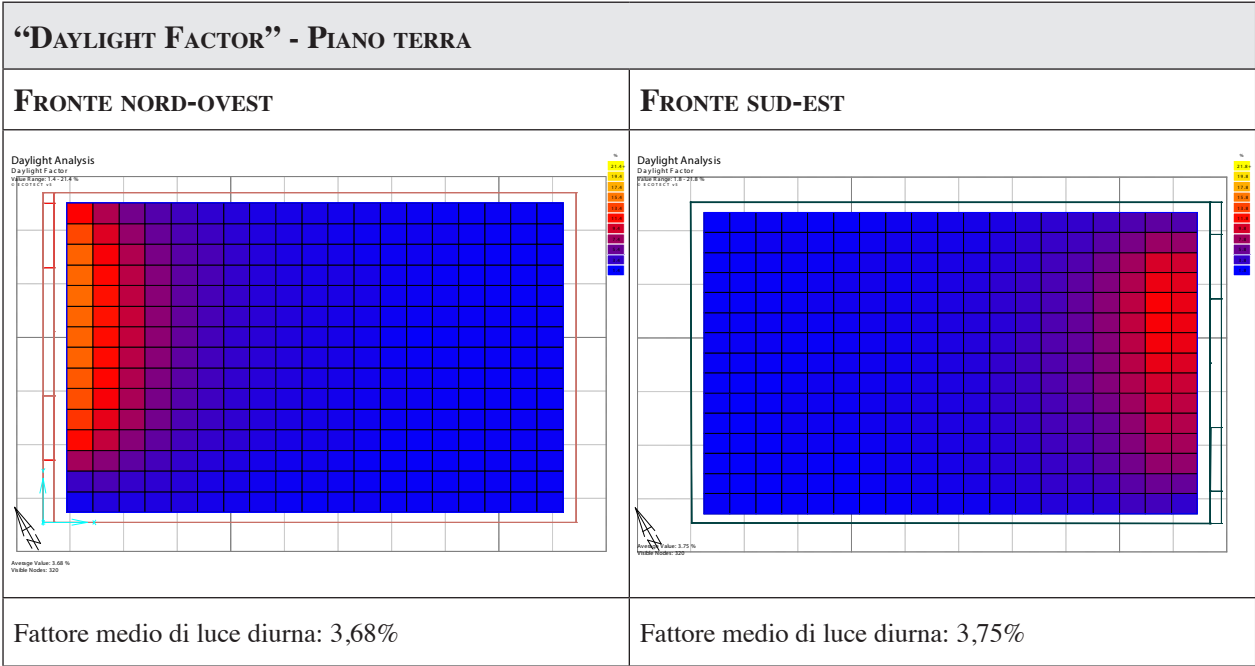
FRONTE SUD-EST



Livello di illuminazione medio: 376,24 lux



[Fig. 107] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione in pianta e in prospettiva del livello di illuminazione naturale all'interno delle aule tipo del piano primo, per l'affaccio nord-ovest e sud-est.



[Fig. 108] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione in pianta del fattore medio di luce diurna FDLM all’interno delle aule tipo del piano terra e del piano primo, per l’affaccio nord-ovest e sud-est.

In conclusione, i dati raccolti attraverso l'analisi dell'illuminazione naturale dimostrano che i limiti imposti dalla normativa per le aule sono rispettati su entrambi i livelli e su entrambi i fronti: secondo la norma *UNI 10804*, infatti, il fattore medio di luce diurna *FDLM* deve essere maggiore o uguale al 3% per le aule scolastiche.

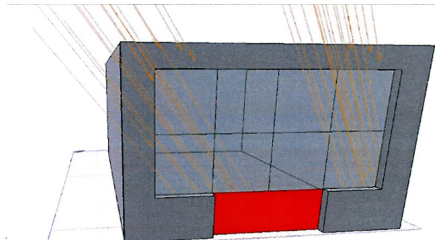
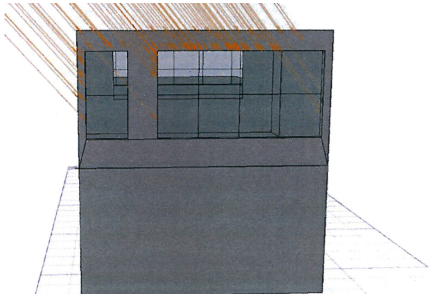
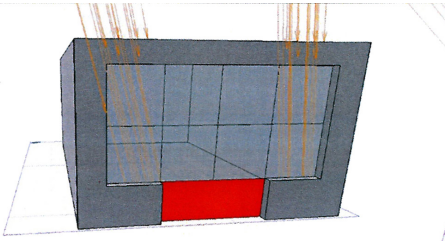
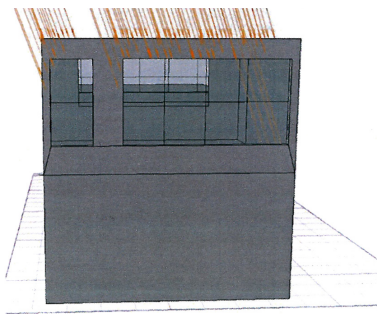
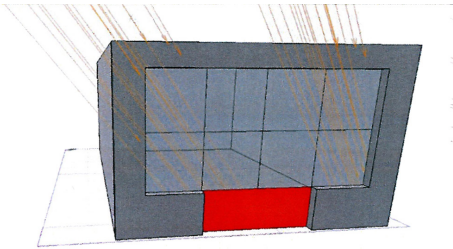
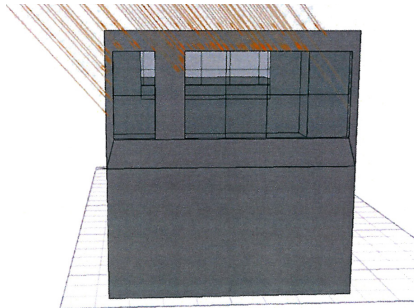
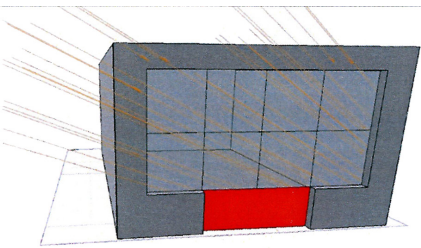
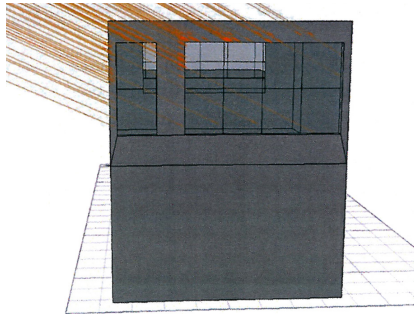
Nello specifico, si osserva che il valore di *FDLM* relativo alle aule situate al piano terra si distacca molto da quello delle aule situate al piano primo: al piano terra si rileva un fattore medio di luce diurna intorno al 3,7%, di poco superiore al 3% imposto dalla normativa, e livelli di illuminazione giornalieri medi intorno ai 200 lux; al piano primo, invece, si attestano valori molto più elevati, con un *FDLM* che raggiunge il massimo valore pari a 7,34% nell'aula esposta a nord-ovest e livelli di illuminazione medi di circa 400 lux. Questo fenomeno si verifica perché il rapporto di finestratura è maggiormente elevato in corrispondenza del piano primo, in cui le aule presentano un affaccio sul lato esterno che dà sul giardino e un affaccio sul lato interno verso una zona filtro che permette l'accesso alle terrazze e che, quindi, è notevolmente illuminata.

L'analisi solare risulta uno strumento fondamentale di verifica, preliminare alle scelte da compiere in fase di progettazione dei dispositivi di protezione dalla radiazione solare incidente che, in rapporto alla destinazione d'uso dell'edificio, danneggia il comfort termico e visivo e la qualità dello svolgimento delle attività didattiche.

Questo tipo di analisi solare viene condotta per i solstizi e gli equinozi, alle ore 12.30 per il prospetto sud-est, e alle ore 15.30 per il prospetto nord-ovest. Dalle immagini riportate di seguito, si osserva molto bene come i raggi solari investano le vetrate a nastro per tutta la loro altezza, facendo emergere così la necessità di integrare schermature che proteggano le finestre dai raggi, sia orizzontalmente che verticalmente [Fig. 109, 110].

ANALISI INCIDENZA RADIAZIONE SOLARE		
	PROSPETTO NORD-OVEST	
	PIANO TERRA	PIANO PRIMO
21 MARZO EQUINOZIO DI PRIMAVERA		
21 GIUGNO SOLSTIZIO DI ESTATE		
21 SETTEMBRE EQUINOZIO DI AUTUNNO		
21 DICEMBRE SOLSTIZIO DI INVERNO		

[Fig. 109] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione dell'incidenza della radiazione solare per i prospetti delle aule tipo del piano terra e del piano primo esposte a nord-ovest, durante gli equinozi e i solstizi.

ANALISI INCIDENZA RADIAZIONE SOLARE		
	PROSPETTO SUD-EST	
	PIANO TERRA	PIANO PRIMO
21 MARZO EQUINOZIO DI PRIMAVERA		
21 GIUGNO SOLSTIZIO DI ESTATE		
21 SETTEMBRE EQUINOZIO DI AUTUNNO		
21 DICEMBRE SOLSTIZIO DI INVERNO		

[Fig. 110] Analisi solare, svolta con *Ecotect Analysis*: rappresentazione dell'incidenza della radiazione solare per i prospetti delle aule tipo del piano terra e del piano primo esposte a sud-est, durante gli equinozi e i solstizi.

Dopo aver svolto una accurata analisi dell'illuminazione naturale interna e uno studio dell'orientamento dei raggi solari e della loro incidenza sulle finestre a nastro, caratterizzanti i prospetti della scuola oggetto di studio, viene condotta una verifica sull'efficienza dei possibili dispositivi di ombreggiamento applicabili al caso di studio.

Per svolgere questo studio, si utilizza una applicazione del software *Ecotect Analysis*, che consente di disegnare e dimensionare aggetti, pensiline, pergole e *louvres*. Lo strumento offerto consiste in un'interfaccia che visualizza il modello 3D di un semplice muro dotato di una finestra di dimensioni standard, che può essere interattivamente adattata e ruotata a seconda delle esigenze: una volta determinato l'orientamento ottimale, l'interfaccia permette di generare svariati tipi di dispositivi di ombreggiamento e di condurre una analisi delle ombre su base annuale e giornaliera.

Nel caso specifico dell'edificio studiato, questo strumento viene utilizzato per le finestre esposte a sud-est, dunque per il prospetto che risente maggiormente delle problematiche dovute all'abbagliamento e al surriscaldamento durante le prime ore della giornata. Per tale esposizione, viene valutato l'ombreggiamento e l'illuminazione interna, con diversi tipi di schermatura, diverse inclinazioni e diverse dimensioni.

I manuali di bioclimatica individuano le schermature verticali come schermature idonee per gli orientamenti ovest ed est, mentre per gli orientamenti sud indicano le schermature orizzontali. Nel caso del particolare orientamento del fabbricato oggetto di studio, l'analisi svolta sulle finestre del lato esposto a sud-est rileva come entrambe le soluzioni possano essere considerate valide per ottenere un buon livello di schermatura della radiazione solare incidente.

Per questo motivo, la soluzione progettuale proposta si orienta verso un dispositivo di ombreggiamento costituito da lamelle profonde circa 10 cm, disposte secondo un'inclinazione di 60° rispetto al piano orizzontale, perfettamente integrate all'interno delle celle esagonali caratterizzanti il pannello prefabbricato proposto dal sistema *G-SKinnED*. La grande potenzialità offerta dai software di progettazione parametrica consiste nella possibilità di dimensionare e orientare i *brise soleil* in maniera personalizzata, valutandone le proprietà in funzione dell'orientamento e delle specificità dell'edificio, secondo un sistema in grado di rispondere sempre al requisito di involucro continuo e integrato.

L'analisi quantitativa dell'illuminazione per le aule del piano primo mostra una riduzione del *FDLM* al 6% circa e un abbassamento dei livelli di illuminazione a 370 lux (contro il 7,6% e i 480 lux iniziali), oltre che una riduzione netta della luce riflessa interna, per questa soluzione. Si può affermare, quindi, che l'intervento è soddisfacente, in quanto porta a una riduzione dei livelli di illuminazione senza oscurare eccessivamente le aule, migliorandone così il comfort visivo e termico al suo interno.

IV.4 CRITERI PROGETTUALI DI INTERVENTO

La maggior parte degli edifici destinati ad accogliere le scuole secondarie di primo grado, realizzata durante il periodo tra 1960 e il 1980, presenta prevalentemente una struttura in conglomerato cementizio armato, totalmente o parzialmente prefabbricata, con tamponamenti in pannelli prefabbricati di cemento armato e altri materiali.

In definitiva, si tratta di strutture dall'aspetto attualmente molto decadente, che presentano importanti segni di degrado a livello strutturale-costruttivo ed estetico-architettonico, determinando significative criticità. Al contempo, queste strutture costituiscono oggetti edilizi di grande interesse per lo sviluppo di nuove soluzioni architettoniche di recupero, lasciando intravedere un elevato potenziale nelle loro determinate caratteristiche formali e morfologiche, particolarmente semplificate.

L'applicazione di interventi finalizzati alla riqualificazione architettonica di questi fabbricati, se accuratamente progettati in funzione delle specificità costruttive e ambientali, può condurre a miglioramenti significativi degli aspetti prestazionali, strutturali ed energetici, oltre che degli aspetti legati alla qualità architettonica degli stessi.

Per quanto riguarda le prestazioni meccaniche, l'elevata vulnerabilità di queste strutture prefabbricate a uno o due piani, caratterizzate dall'assenza di continuità strutturale, è stata evidenziata dai numerosi meccanismi di danno innescati dagli eventi sismici di maggio 2012. Le sollecitazioni orizzontali indotte dal sisma hanno messo in evidenza la forte problematica legata alla stabilità e resistenza di questo tipo di edilizia prefabbricata, che per sua natura tipologico-costruttiva non è stata progettata per resistere alle azioni sismiche. I significativi danni riscontrati sul patrimonio edilizio recente realizzato con le moderne tecniche di prefabbricazione hanno messo così in evidenza le complesse problematiche attuali legate alla risoluzione tecnica della vulnerabilità strutturale di questi edifici, mediante l'adozione di soluzioni progettuali di intervento da attivare a breve e lungo termine.

Occorre rilevare l'importanza di svolgere una approfondita analisi dello stato conservativo degli edifici e dei costi-benefici relativi all'adozione di eventuali soluzioni progettuali per il recupero degli stessi: in alcuni casi, realizzare determinati interventi di miglioramento sismico e riqualificazione architettonica può risultare non vantaggioso in termini economici, inducendo così l'Ente gestore a orientarsi verso interventi di demolizione⁴⁹.

A questo proposito, si ricorda infatti che, in seguito all'evento sismico di maggio 2012, la Regione Emilia Romagna ha deciso di intervenire differentemente, a seconda dell'entità dei danni

⁴⁹ Questo è il caso dell'I.C. "Carracci", nel quartiere Saragozza di Bologna: queste ex scuole Medie sono state chiuse nel 2010 a causa del rilevamento di importanti problemi strutturali che minacciavano pesantemente la sicurezza del fabbricato. Attualmente il fabbricato si trova in attesa di demolizione e ricostruzione, in vista della riapertura di una nuova scuola nell'anno 2017.

arrecati alle scuole e alle esigenze degli specifici Comuni. Infatti, parallelamente agli interventi di miglioramento sismico, nelle zone limitrofe agli epicentri del terremoto, caratterizzate dalla pesante presenza di scuole inagibili, la Regione ha indetto un bando per la realizzazione di Edifici Scolastici Temporanei (EST)⁵⁰, attribuendo peraltro grande importanza alle qualità estetico-architettoniche.

La fase di valutazione, trattata all'interno del presente capitolo, è finalizzata a evidenziare l'importanza del ruolo della caratterizzazione costruttiva del patrimonio edilizio recente all'interno del processo di acquisizione di informazioni sistematizzabili, finalizzata a raggiungere un miglior livello di comprensione delle problematiche di vulnerabilità strutturale.

I presupposti sui quali si fondano i metodi di valutazione affrontati all'interno di questa fase seguono la linea delle esperienze maturate negli ultimi decenni in ambito di analisi della vulnerabilità sismica, in analogia con l'analisi del patrimonio edilizio storico in muratura portante. In linea con le esperienze elaborate da Giuffrè⁵¹, si rileva l'esigenza di partire da analisi conoscitive preliminari, relative alle caratteristiche tipologico-costruttive e strutturali degli edifici, da arricchire successivamente grazie allo studio delle trasformazioni subite, per giungere alla definizione di corretti criteri di analisi e intervento.

La ricerca si focalizza sulla raccolta e analisi del patrimonio conoscitivo che ha caratterizzato la costruzione moderna italiana durante l'ultimo secolo, sia in termini di soluzioni tecnico-costruttive in cemento armato, che in termini delle esperienze costruttive principali che hanno caratterizzato e influenzato lo svilupparsi dell'architettura scolastica moderna.

Nel corso di questa Tesi, mediante la stesura di schede tecniche di valutazione speditiva, viene riportata la raccolta di un repertorio di soluzioni tipologico-costruttive impiegate per la realizzazione dei complessi scolastici. Dalla caratterizzazione dell'insieme degli edifici destinati all'istruzione secondaria di primo grado, si ottiene un valido contributo alla comprensione della vulnerabilità strutturale del patrimonio edilizio scolastico recente, riducendo conseguentemente la complessità del fenomeno.

50 "L'appalto indetto dal Bando EST è rivolto a edifici "tecnicamente idonei e pienamente conformi alla normativa di prevenzione antisismica, nonché qualitativamente idonei (...), ubicati nei Comuni della regione Emilia Romagna colpiti dagli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012, ai fini di dare funzionalità a nidi, scuole d'infanzia, scuole primarie e scuole secondarie di I e di II grado" nelle province di Ferrara, Reggio Emilia, Bologna e Modena. (...) Per il Bando EST, 200 imprese hanno partecipato alla realizzazione delle 39 scuole temporanee diffuse nei 28 lotti oggetto di gara, e soltanto una ventina di esse si è aggiudicata uno o più lotti, per un investimento totale di 54 milioni (opere di urbanizzazione escluse). In generale, gli EST sono composti prevalentemente dall'assemblaggio di "elementi prefabbricati, con struttura portante in legno, acciaio, c.a. prefabbricato, pannelli a cassero a perdere in polistirene espanso sinterizzato pre-armati (...) o altra tipologia costruttiva", nel rispetto dei tempi contenuti previsti. Un paio di imprese ha curato internamente la progettazione della scuola temporanea, mentre le altre si sono rivolte a progettisti esterni, talvolta affidandosi a una consolidata collaborazione, talvolta invece trovandosi a cooperare con essi occasionalmente." (Cecilia Mazzoli, *Il Bando EST - Edifici Scolastici Temporanei per la ripresa dell'Emilia*, in Laboratorio "Ricerca Emilia" e Dottorato di ricerca in Architettura dell'Università di Bologna (a c. di), "ARCHITETTURE PADANE-ARCHITETTURE 46", Volume e Mostra, CLUEB, Bologna 2013.)

51 Giuffrè A., *Lettura sulla meccanica delle murature storiche*, Kappa, Roma 1990.

Per quanto riguarda le prestazioni energetiche e ambientali, l'analisi svolta secondo modalità maggiormente approfondite, tali da consentire la corretta determinazione dei fattori di consumo energetico e di benessere interno agli ambienti, in relazione alla funzione dei fabbricati, porta alla luce le significative carenze prestazionali delle scuole bolognesi.

L'approccio adottato dal preliminare metodo di valutazione speditiva si basa sulla riduzione della complessità del patrimonio edilizio esistente e sulla semplificazione del problema mediante il riconoscimento dei tratti fondamentali e caratteristici, all'interno del vasto insieme degli edifici realizzati nell'ultimo secolo, partendo dall'analisi approfondita di situazioni circoscritte al territorio comunale di Bologna.

L'acquisizione dei dati necessari per lo svolgimento della valutazione delle carenze energetiche di ognuna delle trenta scuole avviene tramite l'adozione di varie modalità di ricerca per la ricostruzione del sapere tecnico e costruttivo e per il riconoscimento di quegli elementi considerati rilevanti: ricerche archivistiche, indagini bibliografiche e sopralluoghi speditivi in situ, volti alla verifica diretta del livello di carenze prestazionali.

Soltanto in seguito a una successiva analisi quantitativa approfondita delle prestazioni energetiche e strutturali, è possibile procedere alle opportune valutazioni sulle soluzioni progettuali volte al miglioramento del comportamento energetico dell'edificio, in funzione anche dei relativi costi, compatibili con i limiti di spesa messi a disposizione dall'Ente gestore.

Sulla base di una attenta analisi costi-benefici e di un confronto con gli Enti che gestiscono direttamente l'edificio in merito ai consumi energetici ed economici dell'edificio oggetto di studio, è possibile definire le modalità di intervento e le misure più idonee da adottare, volte a risolvere le maggiori criticità emerse dalle indagini.

In generale, gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici sono volti alle seguenti azioni: controllo della trasmissione di calore dovuta alla dispersione attraverso le superfici di involucro; riduzione dei consumi energetici dovuti agli impianti di riscaldamento invernale e di climatizzazione estiva; controllo degli apporti solari gratuiti, dovuti ai dispositivi esterni e interni e agli abitanti; raggiungimento di elevati livelli qualitativi di comfort termoigrometrico degli ambienti interni.

Alla luce di queste importanti considerazioni in merito alle criticità e ai potenziali del patrimonio edilizio recente, studiato approfonditamente dal progetto di ricerca, si avverte l'esigenza di focalizzarsi su un nuovo tipo di approccio al disegno delle facciate, modulate da morfologie che consentano di superare l'impiego diffuso di criteri costruttivi basati su una marcata semplificazione formale di soluzioni architettoniche, attraverso una strategia di intervento applicabile a una serie di fabbricati che presentano gli stessi caratteri costruttivi.

In particolare, si concentra l'attenzione sullo studio di un metodo basato sull'elaborazione

di forme più complesse, adattabili alla configurazione spaziale tipologica esistente, volto alla realizzazione di un nuovo involucro edilizio continuo. L'orientamento verso strutture ad alta ecosostenibilità, costituite da materiali innovativi di riciclo, abbinate anche all'uso di cromie variabili, potrebbe rappresentare un elemento di valorizzazione e caratterizzazione del patrimonio edilizio.

Malgrado la neutralità morfologica tipica degli edifici scolastici prodotti dalle sperimentazioni di prefabbricazione, lo studio di questo repertorio solleva interessanti considerazioni sulla validità architettonica delle opere e sulla possibilità di conferire loro identità architettonica maggiormente definita, mediante interventi di recupero volti a riqualificare il patrimonio dal punto di vista estetico e prestazionale.

In questo contesto, si avverte la necessità di approfondire lo studio di strumenti e metodi operativi per gli interventi di recupero e riqualificazione architettonica del patrimonio edilizio scolastico recente, mediante l'impiego di soluzioni sostenibili, per il miglioramento del comportamento strutturale ed energetico dell'involucro.

Il progetto di ricerca tende alla definizione di procedimenti costruttivi ecocompatibili per la realizzazione di un nuovo involucro, nel rispetto dei requisiti prestazionali richiesti dalle attuali normative e delle esigenze di flessibilità progettuale e resa estetica. L'interesse è rivolto alla gestione coordinata dell'intero processo - durante le fasi di analisi, progetto, esecuzione - mediante sistemi di rilevazione geometrica e strumenti informatizzati CAD-CAM, connessi a software di programmazione parametrica per la modellazione di superfici in grado di adattarsi alla morfologia esistente degli edifici, a loro volta interfacciabili con macchine a controllo numerico CNC per la produzione industrializzata di soluzioni "su misura".

V. Il progetto di intervento per la Scuola Media “Dozza”
Le projet d'intervention de l'École Secondaire “Dozza”

INTRODUZIONE

La presente Tesi di Dottorato analizza l'intero patrimonio scolastico esistente del Comune di Bologna appartenente all'edilizia prefabbricata del secondo dopoguerra, realizzata durante gli anni 1960-80, nell'ottica di prevedere interventi ecocompatibili di riqualificazione energetica ed architettonica dei fabbricati.

Questo cospicuo patrimonio immobiliare, attualmente, risulta però spesso inadeguato alle esigenze odierne, evidenziando numerose problematiche in termini di consistenza edilizia, sicurezza strutturale, funzionalità, efficienza energetica e salubrità: come rilevato all'interno del precedente capitolo, sono riscontrabili infatti molteplici criticità, prevalentemente relative al consumo di risorse, al benessere dell'ambiente interno, oltre che alla gestione da parte degli Enti pubblici incaricati alla loro gestione.

La base informativa raccolta durante la fase iniziale di ricerca rappresenta una sorta di dizionario tecnico di ausilio nella formulazione di soluzioni progettuali per il miglioramento strutturale, l'efficientamento energetico e la riqualificazione architettonica degli edifici, nel rispetto della compatibilità con il sistema costruttivo originario.

La classificazione dell'edilizia scolastica bolognese, presentata in *Appendice*, si focalizza particolarmente sugli aspetti concernenti le nuove tecniche costruttive e l'impiego di materiali innovativi per l'epoca, procedendo alla redazione di una raccolta di soluzioni eseguite in maniera sistemica, seguendo apposite schede tecniche.

Il progetto, infatti, propone di fornire un valido sistema di valutazione qualitativa e quantitativa per la classificazione del patrimonio edilizio, che comprenda tutti gli aspetti necessari a una completa e corretta valutazione delle principali caratteristiche: tipologia morfologica, tipologia strutturale, tipologia distributiva, orientamento, tipologia di serramenti e finestrate, rilievo geometrico di massima, superficie [m²], volume [m³]. Da tali fattori è possibile successivamente calcolare il fabbisogno specifico di energia [kWh/m³anno], il consumo totale annuo, e la totalità dei fattori energetici necessari per progettare interventi di efficientamento dell'involucro edilizio.

In seguito alla classificazione svolta sugli edifici scolastici selezionati dal progetto di ricerca, si può constatare la ricorrenza di situazioni nelle quali si identifica la corrispondenza fra le scelte tipologico-costruttive effettuate durante gli anni Sessanta, anche in relazione alla tendenza alla tipizzazione nella produzione di edifici scolastici su modelli riconoscibili a seconda dei momenti storici.

Emerge così la necessità di recuperare gli edifici scolastici esistenti sotto vari aspetti, sia ri-progettando gli spazi per adeguarli allo svolgimento delle attività didattiche, sia attuando interventi di riqualificazione rivolti tanto agli aspetti ambientali quanto a quelli architettonici e tecnologici.

La previsione di interventi basati sull'ottimizzazione dell'impiego di risorse assume ulte-

riore rilievo in rapporto alla necessità di contribuire all'innalzamento della qualità edilizia e, al contempo, migliorare la gestione delle risorse economiche a disposizione degli Enti pubblici per la riqualificazione del patrimonio pubblico comunale di Bologna, all'interno del quale le scuole rappresentano una parte significativa.

In questo contesto di inefficienza prestazionale degli edifici esistenti realizzati nel dopoguerra, il progetto di recupero rappresenta un'opportunità per attuare una riqualificazione energetica attraverso una diminuzione dei consumi in fase di esercizio, mediante l'implementazione della capacità isolante dei sistemi di involucro edilizio.

A questo obiettivo primario di riqualificazione si aggiunge l'esigenza di attuare una sensibile riconfigurazione formale dell'edificio, in base alle modifiche concesse dagli attuali parametri urbanistici. Questo fattore può implicare anche l'attuazione di una modifica volumetrica, tramite la strategia dell'addizione, per apportare importanti variazioni alla fabbrica oggetto di intervento, non soltanto dal punto di vista prestazionale, bensì anche estetico-architettonico.

Mossi dalla volontà di andare oltre gli aspetti tecnologico-costruttivi esclusivamente in termini di parametri prestazionali che definiscono il sistema edilizio, la Tesi di Dottorato esplora varie soluzioni per l'adeguamento energetico dell'involucro edilizio che possano essere declinate secondo modalità di linguaggio riconducibili a un'idea architettonica coerente alla scala del complesso scolastico¹.

In questo ambito si inserisce la specifica soluzione progettuale proposta, con l'intento di adempiere a uno dei principali paradigmi di ricerca, ossia quello di fornire un valido strumento di indirizzo per effettuare consapevolmente le scelte di adeguamento prestazionale in rapporto a un orizzonte più ampio che coinvolga anche il significato architettonico dell'edificio.

Tra i vari criteri di intervento adottabili in ambito di recupero del patrimonio esistente, la ricerca si orienta verso l'efficientamento energetico del componente edile di involucro, tendendo allo studio di una soluzione di "pelle tecnologica continua". La concezione del sistema costruttivo si orienta verso una sequenza di materiali associati che interagiscano e funzionino in modo compatibile e sinergico.

In particolare, la ricerca si orienta verso lo sviluppo di una soluzione costruttiva di involucro "attivo", concepita come principale elemento di scambio termico tra l'ambiente esterno e interno e come primario elemento di visibilità e riconoscibilità di un edificio, in cui le proprietà isolanti e massive sono affidate a un materiale innovativo ecosostenibile, integrato all'interno di un componente di facciata applicabile a secco, dagli esiti architettonici soddisfacenti.

¹ Mazzotta A., Barelli M. L., Melis B., *Retrofit energetico e qualità del costruito: le linee guida per l'edilizia scolastica della Provincia di Torino*, in "Il Progetto Sostenibile", Manzano (Udine), Giugno 2011, Anno 9 - n° 28, pp. 84-89.

In sintesi, dopo aver svolto le prime analisi, il processo progettuale prosegue secondo le seguenti fasi:

1. valutazione qualitativa e quantitativa dello stato di fatto, relativa alla verifica prestazionale, strutturale ed energetica, del fabbricato;
2. scelta idonea della tecnologia costruttiva di intervento e dei materiali compatibili, in funzione delle caratteristiche prestazionali, delle proprietà fisico-chimiche, e del ciclo di vita previsto per l'addizione volumetrica;
3. verifica prestazionale del comportamento meccanico e termico, tramite simulazioni svolte su modelli digitali tridimensionali, e studio di fattibilità dell'intervento, in termini di analisi costi-benefici;
4. verifica dell'applicabilità costruttiva e delle proprietà riscontrate sui modelli, mediante misurazioni e test svolti su prototipi in scala reale.

Infine, si vuole precisare che l'obiettivo della Tesi non consiste nella redazione di linee guida esaustive di riferimento per l'elaborazione di progetti di Recupero dell'esistente, già formulate da precedenti Tesi di Dottorato. Non è questa la sede, infatti, per delineare ed enunciare in maniera sistemica una serie di misure da adottare in ambito di efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente.

L'obiettivo del lavoro di ricerca consiste, invece, nell'illustrazione di un nuovo processo progettuale per gli interventi di riqualificazione del costruito con incremento volumetrico in facciata che, a partire dal rilievo metrico dell'edificio oggetto di intervento, conduca all'esito finale corrispondente alla formulazione di una soluzione costruttiva modulare, adattabile e applicabile a diversi casi di recupero dell'involucro edilizio.

Le due soluzioni progettuali proposte, elaborate a partire dagli stessi paradigmi di ricerca, accomunate dalla volontà di realizzare una seconda pelle tecnologica di involucro mediante l'impiego di un materiale innovativo ecosostenibile a base ceramica, ottenuto dal riutilizzo di scarti di lavorazione, vengono esposte a titolo di esempio del processo progettuale proposto dalla Tesi. Esse rappresentano infatti l'esito finale di un percorso continuo e integrato che, a partire dalla definizione di precise istanze progettuali, guida gli operatori durante l'intero processo, durante le progressive fasi di analisi, progetto e verifica ultima mediante calcoli e test prestazionali su prototipi realizzati in scala reale.

Dopo una attenta analisi critica delle due soluzioni innovative proposte, si sceglie di elaborare un progetto di riqualificazione basato sul II Sistema innovativo di involucro a trama esagonale, denominato *G-SKinnED - Geopolymers - Sustainable Key for an innovative Envelope Design Geopolymers*, studiato e sperimentato presso i laboratori del *CIRI - Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna.

Come caso di studio su cui applicare la strategia progettuale esposta, si seleziona una scuola particolarmente significativa all’interno del patrimonio edilizio scolastico del Comune di Bologna, presentato all’interno dell’*Appendice - Schede anagrafiche e di rilievo*: l’Istituto Comprensivo n. 1, comprendente la scuola secondaria di primo grado “Dozza”.

V.1 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Come illustrato all'interno del *Capitolo III*, il sistema di involucro *G-SKinnED* si basa sull'assemblaggio a secco di pannelli prefabbricati, composti da una struttura a trama esagonale, comprendenti uno strato di materiale termico isolante innovativo, denominato *AAM - Alkali Activated Material*, accoppiato a uno strato di rivestimento e protezione dagli agenti atmosferici, di supporto per la posa di un dispositivo “attivo”, a base di vernice termocromica.

Tale stratificazione è stata studiata sulla base delle esigenze di riqualificazione energetica della tipologia di edifici prefabbricati in conglomerato cementizio armato, affrontati durante le analisi svolte dal progetto di ricerca. Infatti, le simulazioni svolte in regime stazionario e dinamico dimostrano che il pacchetto costruttivo studiato, caratterizzato da uno strato di 10 cm di materiale termicamente isolante in AAM², seguito da una camera di microventilazione di 4 cm e da uno strato ultimo di rivestimento esterno, consentono di raggiungere buoni valori prestazionali energetici, in termini di trasmittanza e inerzia termica e di benessere termoigrometrico.

Infatti, nel caso specifico della Scuola Media “Dozza”, grazie all'applicazione di questo intervento sull'involucro opaco, si passa da un valore iniziale non regolamentare di trasmittanza termica stazionaria $U = 0,927 \text{ W/m}^2\text{K}$ (fornito dalla parete perimetrale esistente in doppio strato di conglomerato cementizio armato con intercapedine isolante in polistirene, di spessore totale 21 cm) a una struttura regolamentare caratterizzata da un valore di $U = 0,325 \text{ W/m}^2\text{K}$, nel rispetto del *D.lgs 29 dicembre 2006, n. 311*, che impone una U limite di $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Inoltre, si passa da un valore scadente di trasmittanza termica periodica $Y_{IE} = 0,5300 \text{ W/m}^2\text{K}$, a un valore buono pari a $0,0319 \text{ W/m}^2\text{K}$, inferiore al limite imposto dal *D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59*, pari a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le pareti opache verticali, orizzontali o inclinate, per le località più soleggiate. Infine, mediante questo intervento, viene rispettato anche il valore della capacità termica areica di $C_{IP} = 113,63 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, che supera abbondantemente il limite indicato corrispondente a $C_{IP} \geq 50$ per $Y_{IE} \leq 0,04$.

Il pannello progettato, dotato di una geometria complessa, viene realizzato in materiale polimerico, mediante l'utilizzo di macchine CNC e *3D Printer* per la stampa di modelli digitali CAD, elaborati precedentemente grazie a software di progettazione parametrica. Grazie a questa tecnologia, è possibile dotare il pannello di una apposita sagomatura, tale da comprendere un'intercapedine interposta fra lo strato isolante e lo strato ultimo di rivestimento, dal ruolo di microcamera di ventilazione: i benefici apportati da questa lamina d'aria sono molteplici, in termini di traspirabilità del muro, evaporazione della condensa interstiziale e dunque di benessere termoigrometrico all'in-

² In particolare, ci si riferisce a un materiale termico isolante geopolimerico AAM caratterizzato dai valori seguenti, corrispondenti ai valori ricercati durante le successive sperimentazioni costruttive: densità $d = 200 \text{ kg/m}^3$, coefficiente di conducibilità $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, calore specifico $c_s = 1.080 \text{ J/kgK}$, coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo $\mu = 5$, resistenza meccanica a compressione $R_c = 3,5 \text{ MPa}$.

terno dell'edificio.

Risulta importante rilevare come la trama esagonale della struttura costituente lo strato coibente sia differente da quella esterna di rivestimento: tale discostamento deriva da una differente funzione della struttura esagonale per i due strati che collaborano alla realizzazione del componente di facciata.

La struttura sottostante, adiacente alla facciata esistente del fabbricato, presenta una maglia esagonale maggiormente fitta (esagoni di lato pari a 8,6 cm), in quanto la sua duplice funzione consiste non solo nel contenimento della malta isolante durante la fase pre-cantiere (cassaforma a perdere), bensì anche nel conferimento di rigidità per forma al pannello coibente, costituito da uno strato di 10 cm di materiale isolante AAM.

La struttura a trama esagonale più esterna di rivestimento, invece, presenta una maglia maggiormente larga (esagoni di lato pari a 34,5 cm), in quanto il suo duplice ruolo risponde alla necessità di un sistema integrato di nervature per la protezione agli agenti atmosferici e l'auto-ombreggiamento dei componenti di facciata, oltre che di un supporto per la stesura della vernice termocromica su porzioni sufficientemente estese.

Fra lo strato di isolamento termico e quello di rivestimento è interposta un'intercapedine d'aria di spessore ridotto, pari a 4 cm (al fine di impedire la formazione di moti convettivi d'aria), realizzata grazie alla particolare conformazione del pannello stampato con *3D Printing*, dotato di distanziatori integrati.

Alla luce della molteplicità di funzioni svolte dalla struttura di questo pannello, risulta importante che essa sia realizzata con un materiale che presenti i requisiti di leggerezza e resistenza meccanica, in relazione alle sollecitazioni esterne a cui sono normalmente esposte le facciate degli edifici e al sistema di ancoraggio meccanico puntuale del sistema alla parete perimetrale esistente. Inoltre, trattandosi di un componente di facciata a geometria complessa, risulta importante che esso sia realizzato in materiale termoplastico, stampabile mediante le moderne tecnologie di *3D Printing*, che consentono la produzione rapida serializzata delle geometrie elaborate con programmi di modellazione tridimensionale parametrica.

Ogni pannello prefabbricato è dotato di appositi fazzoletti a L asolati, per il fissaggio a scomparsa e, una volta posato in opera e assemblato al sistema, viene connesso alla facciata esistente mediante ancoranti metallici meccanici puntuali (tipo "Fischer FAZ II 10/10"), simili ai sistemi Halfen, tradizionalmente impiegati per l'ancoraggio di pannelli prefabbricati in calcestruzzo. La particolare geometria esagonale del pannello offre la possibilità di ottenere uno specifico sistema di incastro tra i pannelli e, dunque, di ridurre il sistema di connessione fra i componenti, e fra i pannelli stessi e la facciata esistente, con conseguenze benefiche anche in termini di riduzione dei ponti termici e dei punti di discontinuità dell'involucro edilizio.

Infine, lo strato ultimo di finitura della stratificazione del muro è costituito da un dispositi-

vo atto a conferire all’involucro un comportamento “dinamico”, costituito da uno strato di vernice termocromica, dalle proprietà fisiche e ottiche, attualmente ancora oggetto di ricerca. Durante l’inverno, il rivestimento termocromico assumerebbe una colorazione più scura per consentire di assorbire la radiazione solare e, dunque, di accumulare energia termica, mentre durante l’estate la vernice diventerebbe più chiara, permettendo all’involucro di riflettere la radiazione solare e quindi di abbassare la temperatura superficiale.

All’interno del sistema di involucro oggetto di ricerca, lo strato esterno di vernice termocromica consentirebbe quindi di regolare la quantità di radiazione solare assorbita e riflessa e, dunque, la quantità di energia termica accumulata durante i cicli giorno-notte ed estate-inverno da parte dello strato isolante di malta geopolimerica AAM e dalla parete perimetrale esistente.

Come si vede dall’abaco dei moduli di facciata impiegati per il tassellamento delle superfici di involucro, alcuni elementi prevedono una maglia resistente esterna composta da componenti esagonali opachi coibenti e massivi, alternati a componenti più leggeri costituiti da lamelle inclinate di 60° rispetto all’orizzonte, a costituire un sistema di ombreggiamento degli ambienti interni.

La configurazione geometrica di tali dispositivi di ombreggiamento si basa sull’analisi climatica svolta con *Ecotect Analysis* sull’edificio scolastico che presenta un orientamento secondo l’asse eliotermico, ossia lungo l’asse nord-sud, inclinato di 19°. Come affermano le prime teorie climatiche, elaborate durante i primi anni del Novecento, questa disposizione corrisponde alla migliore soluzione per uniformare i valori termici e luminosi ed, effettivamente, il livello di illuminazione naturale all’interno degli ambienti può essere già considerato soddisfacente. Al fine di raggiungere un buon livello di benessere visivo nelle aule, però, occorre proteggere dalla radiazione solare incidente, senza occultare la luce diffusa, mediante l’integrazione di dispositivi idonei di ombreggiamento all’interno del sistema di facciata.

Dalle simulazioni svolte mediante i software di analisi climatica e ambientale, emerge che per un edificio esposto secondo l’asse eliotermico, la predisposizione di *brise soleil* così inclinati porta ad ottenere un buon livello di ombreggiamento all’interno delle aule, durante tutto il corso della giornata. Infatti, considerando la concezione attuale di scuola moderna, attribuita all’Istituto Comprensivo “Dozza” e alle altre scuole pubbliche del Comune di Bologna, occorre affrontare la progettazione degli interventi di riqualificazione energetica dell’involucro esistente valutandone il comportamento energetico durante tutto l’arco della giornata, che vede l’alternarsi di lezioni frontali, attività formative, laboratori e momenti ricreativi.

Sulla base di queste considerazioni, il dispositivo di ombreggiamento integrato studiato viene adottato per il trattamento di entrambi i fronti principali sud-est e nord-ovest (prevalentemente esposti a est e a ovest), in modo tale da conferire all’edificio un livello costante di illuminazione naturale, nel rispetto dei requisiti normativi e delle esigenze di benessere visivo, sia durante le ore di lezione mattutina, sia durante le ore di attività complementari pomeridiane.

Il progetto di riqualificazione energetica proposto per la Scuola Media “Dozza”, applicabile anche agli altri edifici appartenenti alla medesima tipologia edilizia studiata, caratterizzati da analoghe carenze prestazionali e architettoniche, prevede un intervento focalizzato esclusivamente sull’involucro edilizio, opaco e trasparente.

Come si vede dalle restituzioni grafiche riportate di seguito [Fig. 1], il progetto prevede la realizzazione di una seconda pelle in grado di conferire un nuovo involucro continuo e integrato, ad alte prestazioni energetiche. In particolare, il rivestimento ultimo, realizzato mediante uno strato di vernice termocromica, consente di attribuire all’involucro un comportamento “attivo”, capace di cambiare la sua colorazione al variare della temperatura esterna. Durante l’estate, la vernice termocromica assume un colore più chiaro, in grado di riflettere la radiazione solare incidente e dunque abbassare la temperatura superficiale (*rendering* in alto, a destra); viceversa, durante l’inverno, la vernice assume un colore più scuro, in grado di assorbire le radiazioni e favorire l’accumulo di calore dato dall’apporto solare (*rendering* in basso, a destra). Questo dispositivo consente di rispondere ai requisiti di efficientamento energetico e, al contempo, alle esigenze di caratterizzazione architettonica e formale dell’edificio scolastico. Inoltre, il nuovo sistema di involucro, ottenuto dall’assemblaggio a secco di pannelli prefabbricati a trama esagonale, consente di inserire dispositivi di ombreggiamento in grado di raggiungere un buon livello di benessere visivo mediante *brise soleil* integrati nella superficie di involucro, coerentemente con le istanze di ricerca che guidano il processo progettuale esposto.



[Fig. 1] Confronto fra lo stato di fatto e lo stato di progetto dell’edificio Scuola Media “Dozza”: (a sinistra) fotografia del fronte nord-est (in alto) e nord-ovest (in basso) relativi allo stato di fatto del fabbricato; (a destra) fotoinserimenti dei medesimi fronti del modello tridimensionale relativi al progetto di intervento di riqualificazione energetica.

In un primo momento della fase progettuale, viene analizzato il miglioramento energetico ottenuto aggiungendo esclusivamente uno strato di materiale isolante alle porzioni di involucro opaco: in particolare, in corrispondenza delle chiusure verticali si prevede l'aggiunta di uno strato di 10 cm di AAM, mentre in copertura l'aggiunta di uno strato di 5 cm di materiale isolante XPS.

Nella tabella seguente, sono riportati i valori delle dispersioni e del fabbisogno di energia (realizzati con *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*) relativi allo stato di fatto e allo stato di progetto, considerando l'intervento che non contempla l'involucro trasparente, bensì soltanto le porzioni opache:

STATO DI FATTO - DISPERSIONI E FABBISOGNO DI ENERGIA	
Dispersioni attraverso le vetrate	162.010 kWh
Dispersioni attraverso le pareti	66.190 kWh
Dispersioni attraverso i pavimenti su terra	62.100 kWh
Dispersioni attraverso coperture e terrazzi	103.660 kWh
Dispersioni per ventilazione esterna e infiltrazione	319.730 kWh
Dispersioni totali	713.690 kWh
Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale	1.089.281 kWh/anno
Fabbisogno annuo di energia termica	791.560 kWh
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	113 kWh/m ² anno
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	41 kWh/m ³ anno

STATO DI PROGETTO (SOLO INVOLUCRO OPACO) - DISPERSIONI E FABBISOGNO DI ENERGIA	
Dispersioni attraverso le vetrate	162.010 kWh
Dispersioni attraverso le pareti	30.840 kWh
Dispersioni attraverso i pavimenti su terra	62.100 kWh
Dispersioni attraverso coperture e terrazzi	103.660 kWh
Dispersioni per ventilazione esterna e infiltrazione	319.730 kWh
Dispersioni totali	678.340 kWh
Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale	804.299 kWh/anno
Fabbisogno annuo di energia termica	584.469 kWh
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	83 kWh/m ² anno
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	30 kWh/m ³ anno

Come si osserva dai dati, intervenendo soltanto sulle chiusure opache, si riescono a ridurre notevolmente le dispersioni, portando l'edificio dalla classe energetica G alla F³.

3 La determinazione della classe energetica, svolta mediante l'utilizzo dell'applicazione *ReGreeN-ver.1.0.6.xlsm* (*MyGreenBuildings*), si basa sul calcolo dell' EP_l che tiene in considerazione una serie di fattori coinvolti nel comportamento prestazionale dell'edificio. In particolare, si considera: la superficie totale disperdente S_{tot} [m²] e le diverse trasmittanze U [W/m²K] delle superfici disperdenti, da cui dipendono il coefficiente globale di trasmissione termica dell'edificio HT [W/K] e il fabbisogno di energia termica dell'edificio QH [kWh]; il rendimento globale η_g , dato dalla moltiplicazione dei rendimenti di emissione, regolazione, distruzione e generazione; la superficie netta totale calpesta-

Tuttavia, risulta evidente quanto sia insufficiente agire soltanto a livello di involucro opaco: occorre, infatti, valutare attentamente la composizione dell'involucro, inteso nel suo rapporto opaco/trasparente, considerando l'elevato rapporto di finestratura dell'edificio, pari al 60%.

Pertanto, si decide di intervenire sull'involucro sostituendo gli infissi metallici esistenti con infissi in PVC e di sostituire i vetri esistenti con vetri a camera doppia (4-12-4 cm), maggiormente performanti, oltre ad aggiungere uno strato isolante alle porzioni opache, secondo le modalità espresse precedentemente, cioè con 10 cm di AAM in facciata e con 5 cm di XPS in copertura, al fine di abbassare la trasmittanza senza aumentare eccessivamente il peso e lo spessore.

In linea con l'approccio progettuale proposto dalla ricerca, si prevede un intervento che comprenda un sistema di involucro integrato continuo, costituito da componenti modulari di facciata opachi, alternati a moduli semitrasparenti, costituiti da appositi dispositivi di ombreggiamento posti in corrispondenza delle vetrate.

Al fine di conferire continuità architettonica ed estetica al nuovo involucro, si attua la scelta progettuale di lasciare invariata la geometria delle finestre a nastro esistenti, giacenti nel piano delle chiusure perimetrali esistenti, prevedendo comunque la sostituzione di infissi e vetri, maggiormente performanti. Inoltre, l'accorgimento architettonico concernente lo spostamento delle finestre sostitutive, disposte a filo interno, consente di accentuare maggiormente l'effetto finale di una seconda pelle finale continua, in cui gli infissi risultino occultate dall'involucro a maglia esagonale collocato sul livello più esterno. Una volta conferita una superficie regolare e continua all'involucro, la planarità della facciata viene movimentata e modulata dal disegno delle ombre generate dalle nervature dei pannelli, caratterizzate da diverse profondità. Per le porte-finestre collocate in corrispondenza di ogni aula del piano terra, si sceglie di intervenire seguendo il medesimo criterio: per conservare l'affaccio diretto sull'area verde, si prevede l'inserimento di identici moduli di facciata a trama esagonale, costituiti interamente da *brise soleil*, collocati a 2,50 m di distanza dalla facciata, per consentire il flusso di bambini durante le ore di ricreazione.

Per quanto riguarda i dispositivi di ombreggiamento, risulta fondamentale l'analisi solare condotta con *Ecotect Analysis*, finalizzata a valutare qualitativamente e quantitativamente i valori di illuminazione naturale all'interno delle aule e degli ambienti principali caratterizzanti il fabbricato oggetto di intervento. Nello specifico, si può constatare che il prospetto sud-est è illuminato da luce diretta durante le prime ore della giornata, dalle 8.30 alle 13.00, durante tutto l'anno, mentre il prospetto nord-ovest è illuminato durante il pomeriggio, dalle ore 14.30 alle 16.30.

Dall'analisi specifica condotta sulle singole aule, si ricavano i fattori di luce diurna *FDLM* che dimostrano che tutte le aule ricevono un adeguato apporto minimo di luce naturale, nel rispetto

bile riferita alle zone riscaldate A_{pav} e il volume lordo riscaldato V_{lordo} , da cui si ricava il rapporto S_{TOT}/V_{lordo} . Da questi parametri, si calcola il Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale Q [kWh/anno] e l'Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale EP_I [kWh/m³anno]. Infine, la classe energetica determinata a partire dall' EP_I , si riferisce per legge ai limiti EP_I dell'Allegato C del D.lgs 192/05, come modificato dal D.lgs 311/06.

nella normativa vigente attuale, talvolta addirittura eccessivo: infatti, in corrispondenza delle aule del piano primo, la radiazione diretta solare risulta talmente elevata da imporre la necessità di schermare gli ambienti mediante adeguati dispositivi di ombreggiamento, al fine di garantire livelli accettabili di comfort visivo e termico.

Sulla base di queste valutazioni, il progetto di riqualificazione energetica proposto prevede la disposizione di appositi componenti ombreggianti di facciata, della stessa forma esagonale e dello stesso materiale dei moduli di facciata opachi, pertanto perfettamente integrati con essi, costituiti da lamelle inclinate, variabili a seconda dell'orientamento e dell'esposizione alla radiazione solare, modellate mediante software di progettazione parametrica.

Oltre allo studio e alla progettazione del sistema di ombreggiamento interno alle aule, grazie ai software di programmazione parametrica è possibile intervenire sull'ombreggiamento della superficie di facciata. Infatti, attraverso la modellazione parametrica, viene modulata la profondità delle nervature degli elementi esagonali del rivestimento esterno, per creare un sistema integrato di auto-ombreggiamento dei singoli componenti di facciata, volto a garantire un controllo della temperatura di superficie, oltre che un suggestivo disegno di ombre, variabile durante l'arco della giornata e delle stagioni.

Per l'intervento di riqualificazione proposto, viene riportata una tabella riassuntiva dei principali dati energetici, valutati mediante il software *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, necessari per dimostrare quantitativamente gli effettivi miglioramenti prestazionali della soluzione progettuale di involucro.

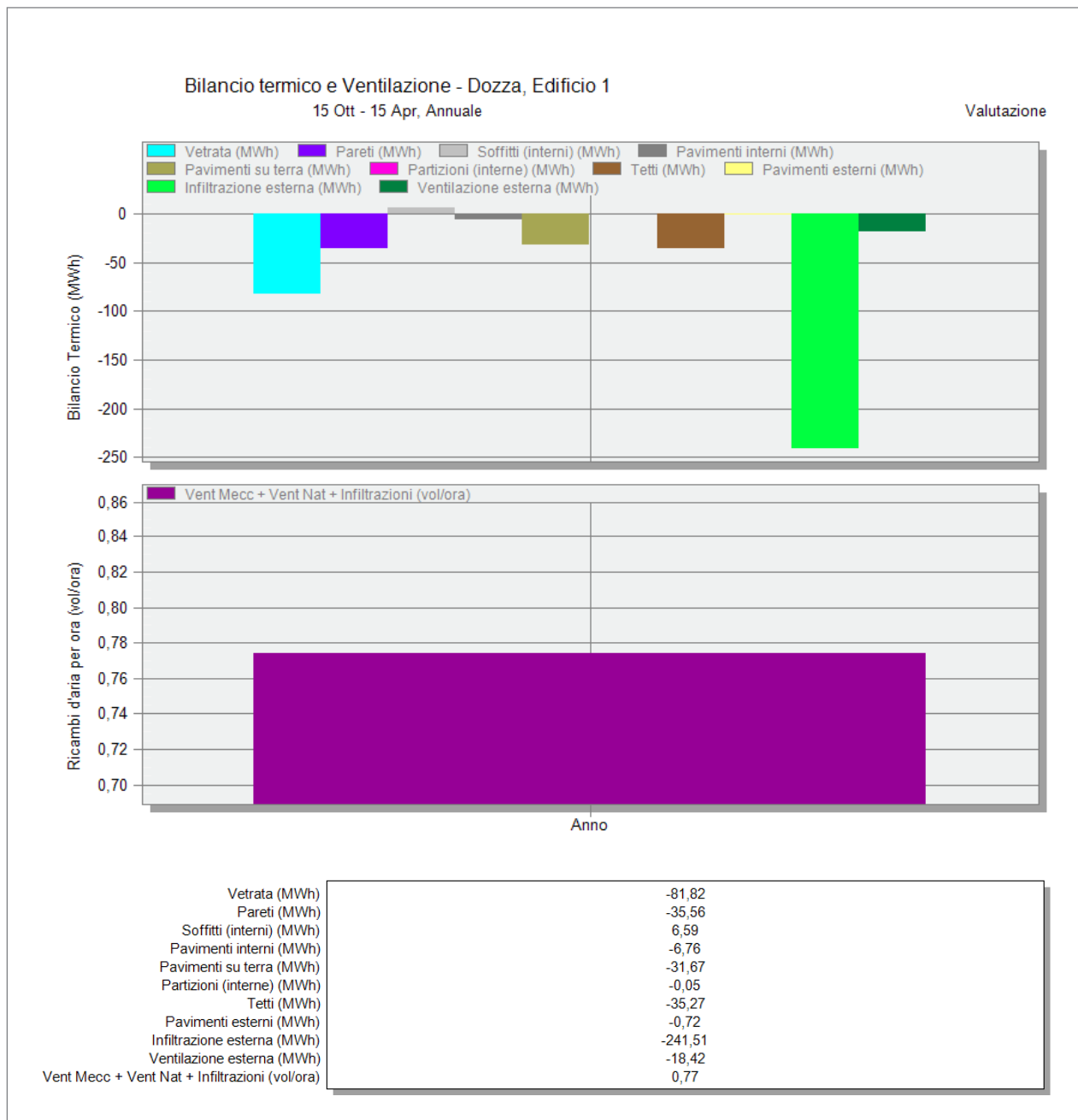
STATO DI PROGETTO (INVOLUCRO OPACO E TRASPARENTE) - DISPERSIONI E FABBISOGNO DI ENERGIA	
Dispersioni attraverso le vetrate	101.010 kWh
Dispersioni attraverso le pareti	30.840 kWh
Dispersioni attraverso i pavimenti su terra	62.100 kWh
Dispersioni attraverso coperture e terrazzi	43.840 kWh
Dispersioni per ventilazione esterna e infiltrazione	325.310 kWh
Dispersioni totali	563.100 kWh
Fabbisogno di energia primaria per la climatizzazione invernale	543.753 kWh/anno
Fabbisogno annuo di energia termica	386.903 kWh
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	55 kWh/m ² anno
Indice di Prestazione Energetica per la climatizzazione invernale	20 kWh/m ³ anno

Dai dati riportati in tabella, si osserva che il valore delle dispersioni totali si riduce del 35% rispetto a quello relativo al fabbricato esistente, pari a 713.690 kWh, dimostrando la possibilità di passare dalla classe G alla classe E, soltanto mediante l'attuazione di interventi sull'involucro (opaco e trasparente), che non coinvolgano interventi sugli impianti.

L'analisi dello stato di progetto complessivo, svolta mediante *Ecotect Analysis*, dimostra come l'intervento previsto porti a un notevole miglioramento delle prestazioni termiche dell'involucro. Di seguito, si riporta una tabella di sintesi rappresentante il confronto fra la trasmittanza stazionaria finale dell'involucro relativa allo stato di progetto e quella relativa allo stato di fatto:

PACCHETTI COSTRUTTIVI				
PARETE ESTERNA A PANNELLI				
MATERIALE	s [cm]	λ [W/mK]	U_{PROGETTO} [W/m²K]	$U_{\text{STATO DI FATTO}}$ [W/m²K]
Isolante termico in AAM	10,0	0,055	0,302	0,786
Pannello prefabbricato in cemento	9,0	1,130		
Isolante in EPS	3,0	0,040		
Pannello prefabbricato in cemento	9,0	1,130		
COPERTURA DELLA SCUOLA				
MATERIALE	s [cm]	λ [W/mK]	U_{PROGETTO} [W/m²K]	$U_{\text{STATO DI FATTO}}$ [W/m²K]
Guaina impermeabilizzante	0,3	1,000	0,239	0,664
Isolante termico in XPS	5,0	0,034		
Massetto in cls	7,0	0,410		
Isolante in lana di legno	4,0	0,040		
Elemento in c.a. prefabbricato	8,0	1,130		
TERRAZZA CALPESTABILE				
MATERIALE	SPESSORE [cm]	λ [W/mK]	U_{PROGETTO} [W/m²K]	$U_{\text{STATO DI FATTO}}$ [W/m²K]
Pavimentazione in piastrelle	1,0	1,000	0,289	0,648
Guaina impermeabilizzante	0,3	1,000		
Isolante termico in XPS	5,0	0,034		
Massetto in cls	7,0	0,410		
Isolante in lana di legno	4,0	0,040		
Elemento in c.a. prefabbricato	8,0	1,130		
COPERTURA DELLA PALESTRA				
MATERIALE	SPESSORE [cm]	λ [W/mK]	U_{PROGETTO} [W/m²K]	$U_{\text{STATO DI FATTO}}$ [W/m²K]
Lamiera in acciaio	1,0	-	0,255	4,400
Guaina impermeabilizzante	0,3	1,000		
Isolante termico in XPS	5,0	0,034		
Massetto in cls	7,0	0,410		
Isolante in lana di legno	4,0	0,040		
Elemento in c.a. prefabbricato	8,0	1,130		

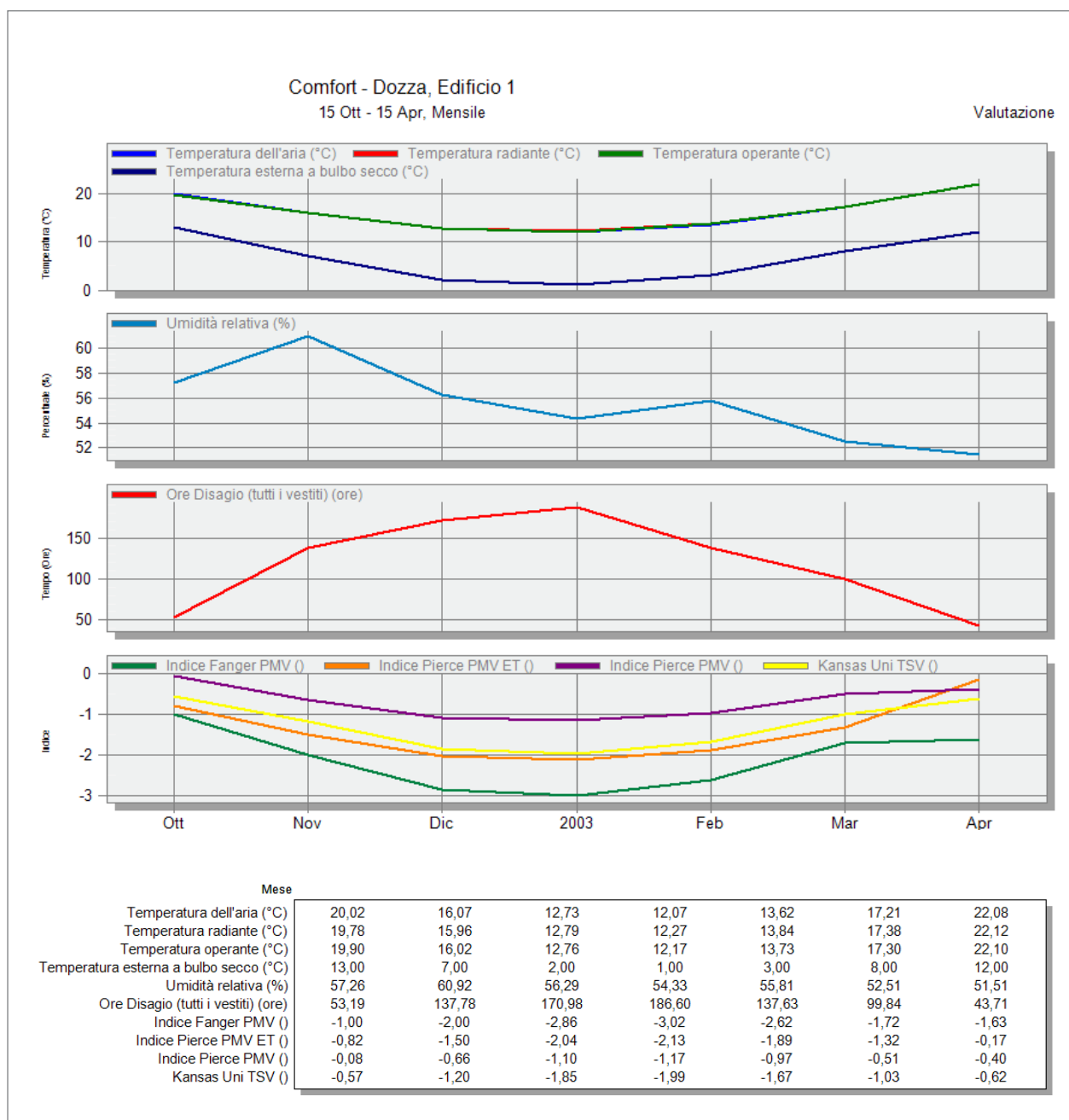
Per verificare gli effettivi miglioramenti prestazionali energetici dell’edificio, in seguito alla realizzazione dell’intervento proposto, si esegue un’ultima simulazione in regime dinamico con il software *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, considerando l’intero edificio completo di strato termicamente isolante aggiuntivo, in facciata e in copertura, di nuovi infissi in PVC con vetro a camera doppia, e di dispositivi di ombreggiamento.



[Fig. 2] Simulazione energetica in regime dinamico, svolta con *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, relativa al periodo invernale compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile: grafici relativi al “Bilancio energetico e alla ventilazione” della Scuola Media Dozza, dopo l’intervento proposto.

In particolare, si riportano di seguito le schede di “Bilancio energetico e ventilazione” [Fig. 2] e di “Comfort” [Fig. 3] relative alla simulazione svolta con riferimento al periodo di riscaldamento, compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile.

Dall’analisi in regime dinamico condotta con *DesignBuilder* sullo stato di progetto finale si nota che le dispersioni totali dell’involucro, opaco e vetrato, si riducono del 30% rispetto allo stato di fatto.



[Fig. 3] Simulazione energetica in regime dinamico, svolta con *DesignBuilder* ed *EnergyPlus*, relativa al periodo invernale compreso fra il 15 ottobre e il 15 aprile: scheda relativa ai grafici del “Comfort” interno alla Scuola Media Dozza, dopo l’intervento proposto.

Inoltre, tale analisi fornisce anche livelli di consumo dell'edificio per il gas e l'elettricità in kWh: attraverso la comparazione dei consumi relativi allo stato di fatto e allo stato di progetto, è possibile confrontare anche il costo di gestione dell'immobile prima e dopo l'intervento [Fig. 3, 4].

Il consumo annuo di gas per lo stato di fatto ammonta a 716.210 kWh, che si riduce a 507.720 kWh per lo stato di progetto. Moltiplicando il consumo [kWh] per il totale di ore all'anno in cui l'impianto di riscaldamento è funzionante e dividendo per il potere calorifico del gas metano, si ottiene il fabbisogno annuo di gas metano [m³].

A partire dal prezzo del gas metano, infine, si deduce il costo di gestione annua dell'edificio che, nel caso dello stato di fatto, è pari a circa 100.000 € mentre, per lo stato di progetto, è pari a circa 60.000 €. Tale risparmio annuo sui costi di gestione, pari al 40%, raggiungibile a seguito dell'intervento sull'involucro, risulta notevole; occorre comunque confrontare questo valore con il costo dell'intervento, al fine di avere un riscontro reale in merito alla sostenibilità economica e sull'effettiva convenienza.

Per tale motivo, è necessario condurre un'analisi costi-benefici, mediante la redazione di un computo metrico dell'intervento e il successivo calcolo del tempo di ritorno, ossia in numero di anni necessari per ammortizzare la spesa iniziale sostenuta per l'esecuzione dell'intervento. In prima istanza, occorre redigere il computo metrico estimativo dell'intervento complessivo, riguardante l'involucro trasparente e opaco, verticale e orizzontale, presentato nelle pagine seguenti.

INVOLUCRO OPACO					
N°	DESCRIZIONE DELLE OPERE	QUANTITÀ	U.M.	PREZZO UNITARIO [€]	PREZZO TOTALE [€]
1	<p>Fornitura e posa in opera di pannelli prefabbricati isolanti in AAM (a base ceramica), costituiti da grigliato polimerico a trama esagonale, accoppiato a uno strato di rivestimento esterno polimerico separato da distanziatori per la realizzazione di una microcamera di ventilazione (4 cm). Ogni modulo, realizzato mediante <i>3D Printing</i>, presenta dimensioni pari a 230x260x10 cm. L'aggancio del pannello alla facciata esistente è realizzato mediante ancoranti in acciaio appositi per cls fessurato e applicazioni sismiche tipo Fischer FAZ II 10/10, posti in corrispondenza delle alette perimetrali di cui ogni pannello viene dotato in fase di produzione con stampa 3D.</p> <p>Lavorazione comprensiva di tagli, sfridi, rinforzi agli angoli, canaline, sigillatura, sottofinestre, ecc. nonché di ponteggi per raggiungere una altezza di 4 m dal piano di appoggio, per tiro e calo dei materiali, compreso ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte.</p> <p><i>(Nota: Trattandosi di materiali innovativi ancora oggetto di ricerca, attualmente non presenti sul mercato, il prezzo unitario di ogni pannello integrato è valutato sulla base della stima del prezzo di pannelli di 10 cm in AAM aerato, pari a circa 30,00 €/m², al quale si aggiunge il prezzo stimato per un grigliato polimerico di grande formato, stampato con 3D Printing, pari a circa 155,00 €/m², cioè pari a 1,5 volte il prezzo di un grigliato in vetroresina ad esso assimilabile)</i></p>	2.072,77	m²	185,05	383.566,09
2	<p>Fornitura e posa in opera di uno strato di vernice termocromica in grado di cambiare le proprietà ottiche in funzione della variazione di temperatura (spessore 0,3 cm).</p> <p>Lavorazione comprensiva di posa, nonché di ponteggi per raggiungere una altezza di 4 m dal piano di appoggio, per consentire il tiro e il calo dei materiali, compreso ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte.</p> <p><i>(Nota: Trattandosi di materiali innovativi ancora oggetto di ricerca, attualmente non presenti sul mercato, il prezzo unitario di questo prodotto è valutato sulla base della stima del prezzo della vernice termocromica, maggiore del 15% rispetto al prezzo di una tradizionale tinta per facciate, pari a circa 13,00 €/m².)</i></p>	2.072,77	m²	14,94	30.967,18
				TOT [€]	414.533,27

COPERTURA					
N°	DESCRIZIONE DELLE OPERE	QUANTITÀ	U.M.	PREZZO UNITARIO [€]	PREZZO TOTALE [€]
3	Demolizione o disfacimento dei manufatti compresi il tiro in alto o il calo in basso, le puntellature necessarie delle parti da demolire, adeguatamente dimensionate, i ponti di servizio interni ed esterni, tutte le precauzioni e cautele per evitare danni ad eventuali fabbricati vicini e a terzi, l'adozione degli accorgimenti atti a tutelare l'incolumità degli operai e del pubblico, l'impiego di mezzi segnaletici diurni e notturni per avvertire i passanti, la recinzione degli spazi di rispetto, l'onere delle cautele da adottare per demolire a piccoli tratti le strutture collegate a ridosso di fabbricati o a loro parti escluse dalla demolizione (tagliando gli eventuali materiali metallici con fiamma o con sega), la riparazione dei danni arrecati a terzi e ogni altro onere e magistero per dare l'opera finita a perfetta regola d'arte. Tutti i materiali o manufatti demoliti restano di proprietà dell'impresa, quali rivestimenti in piastrelle, di maiolica o simili, compresa malta di sottofondo.	2.114,44	m ²	9,66	20.425,49
4	Fornitura e posa in opera di pannelli isolanti per coperture in polistirene espanso estruso tipo Styrodur dello spessore di 5 cm, comportamento al fuoco non inferiore alla classe I, applicati con collanti speciali, compresi gli sfridi, i ponteggi fino a una altezza di 4 m dal piano di appoggio, il tiro e il calo dei materiali, ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte.	3.140,00	m ²	30,00	94.200,00
5	Manto impermeabile prefabbricato costituito da membrana bitume polimero elastomerica armata con "tessuto non tessuto" di poliestere da filo continuo, applicata a fiamma con giunti sovrapposti di 10 cm, con caratteristiche da certificare. Stesa su superfici piane, curve e inclinate, compresi eventuali ponteggi fino a una altezza di 4 m dal piano di appoggio, il tiro e il calo dei materiali, ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte.	3.140,00	m ²	10,50	32.970,00
6	Fornitura e posa in opera delle piastrelle in gres simili a quelle esistenti per rivestimento esterno per terrazzi calpestabili, in opera con collanti speciali, compreso la sigillatura, la pulizia finale e ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte.	1.217,27	m ²	38,61	46.998,79
				TOT [€]	174.168,79

INVOLUCRO TRASPARENTE					
N°	DESCRIZIONE DELLE OPERE	QUANTITÀ	U.M.	PREZZO UNITARIO [€]	PREZZO TOTALE [€]
7	Infissi in PVC per finestre e porte-finestre, a una o più ante, costituiti da telai fissi in PVC saldati a caldo e rinforzati con profilati in acciaio zincati, collegati al controtelaio con idonei ancoraggi; le parti mobili realizzate con microprofilati in PVC saldati a caldo, con all'interno profilati in acciaio zincato di rinforzo; complete di traverse intermedia orizzontali per le porte-finestre, comprese le doppie guarnizioni di battuta, il gocciolatoio, il fermavetro a scatto, l'alloggiamento per il vetro normale o thermopane e relative guarnizioni di tenuta, le cerniere tipo anuba plastificate dell'altezza minima di cm 14, in numero di due per ogni parte mobile della finestra o di tre per le porte-finestre, uno o più paletti a scatto incassati per le porte-finestre e le finestre a più ante, le maniglie e le relative piastre e bocchette in ottone anche cromato, serratura da incasso a scrocco con due chiavi a doppia mandata, ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte, esclusa la fornitura e la posa del vetro e le opere murarie.	1.272	m ²	178,18	226.644,96
8	Vetrare isolanti termoacustiche (vetrocamere), costituite da due lastre di cristallo di spessore mm 4, incolori, separate da opportuni distanziatori e da una intercapedine d'aria disidratata dello spessore compreso da un minimo di mm 6 a un massimo di mm 12, il tutto racchiuso in un profilo d'acciaio inox; poste in opera su infissi di qualunque natura, compresi gli sfridi, i tagli a misura, la sigillatura siliconica, la pulitura, il tiro e il calo dei materiali, i ponti di servizio fino a 4 m dal piano d'appoggio, ogni altro onere e magistero per dare il lavoro finito a regola d'arte.	1.272	m ²	61,97	78.825,84
				TOT [€]	305.470,80
				TOT [€]	894.172,86
COMPRESI ONERI DI SICUREZZA				TOT [€]	983.590,15

Dal computo metrico si nota che l'intervento sull'involucro opaco ha un peso notevole sulla spesa finale, costituendo il 45% del costo dell'intervento, al netto degli oneri di sicurezza: la ragione risiede principalmente nell'utilizzo di un sistema tecnologico innovativo che, stando allo stato attuale dell'arte della tecnologia del *3D Printing*, presenta ancora notevoli barriere economiche per la produzione di elementi di grande formato.

Se dal punto di vista energetico è sempre bene puntare all'adeguamento degli edifici esistenti per ridurre i consumi, spesso gli interventi progettati non risultano sostenibili economicamente, in rapporto ai costi legati alla realizzazione dell'adeguamento stesso.

Per tale motivo, occorre verificare in quanti anni la spesa per tali interventi viene ammortizzata: per fare questa valutazione, ci si avvale del supporto di un foglio di calcolo per la stima semplificata del tempo di ritorno, tenendo in considerazione gli indici finanziari.

Dopo una prima analisi, si evidenziano i miglioramenti in [kWh/m²anno] raggiungibili mediante l'attuazione dei singoli interventi: pertanto, si può notare come entrambi i retrofit, legati sia all'involucro opaco, che all'involucro trasparente, siano essenziali per condurre un miglioramento energetico dell'edificio, arginando le dispersioni termiche globali:

INVOLUCRO	MIGLIORAMENTO DISPERSIONI [kWh/m²anno]	% DISPERSIONI SUL TOTALE POST-INTERVENTO	EFFETTO RETROFIT SULLE DISPERSIONI	RISPARMIO ENERGETICO ANNUO [€]
OPACO	21,5	25%	-65%	18.925
TRASPARENTE	17,5	35%	-50%	20.221

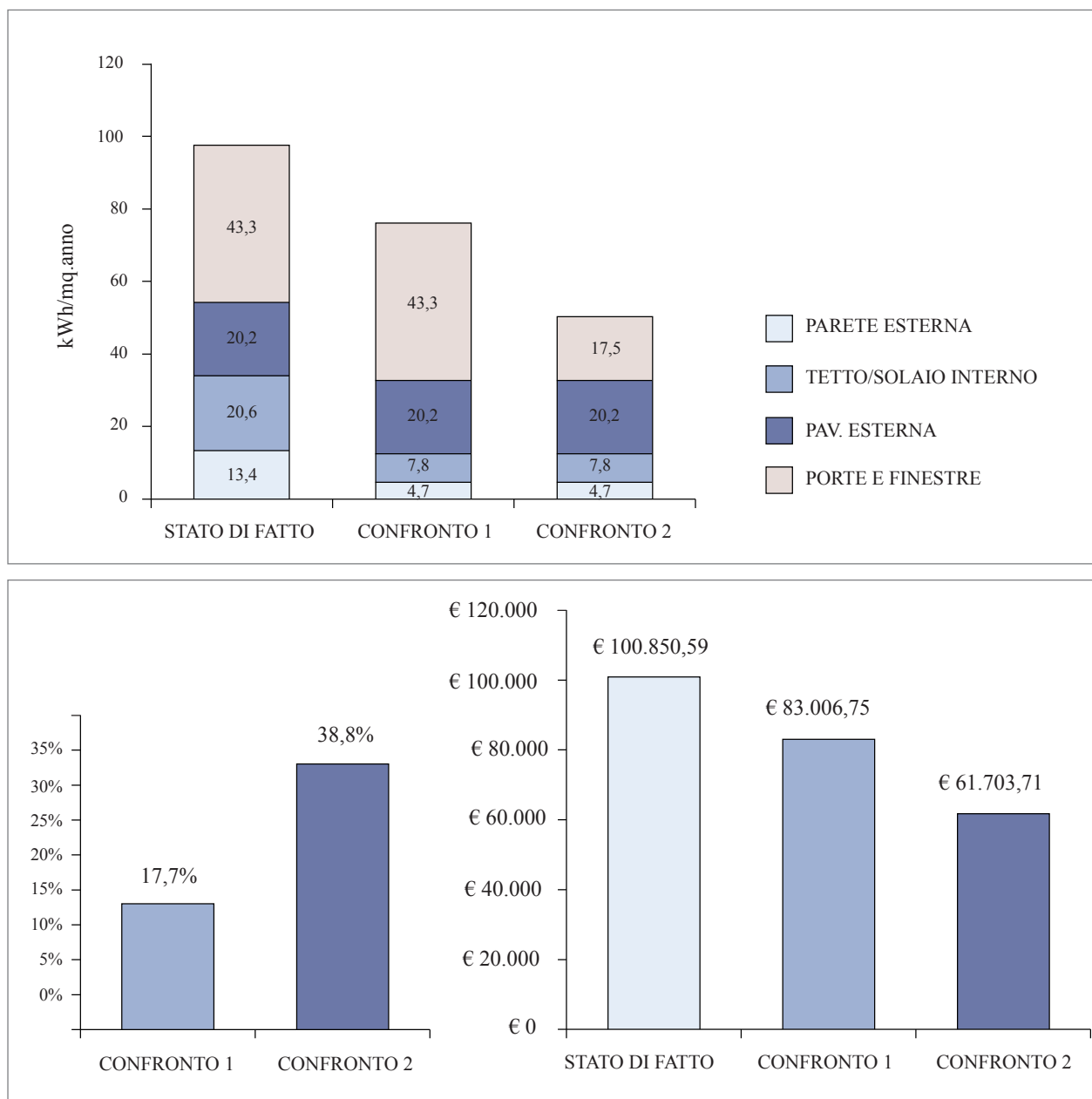
Inoltre, occorre condurre una analisi in merito al costo annuo di gestione dell'edificio scolastico dopo l'attuazione dell'intervento preventivato, e dunque al risparmio annuo di gestione che, se rapportato con il costo totale dell'intervento, porta alla determinazione del tempo di ritorno semplice:

COSTO ANNUO DI GESTIONE DELL'EDIFICIO	COSTO ANNUO DI GESTIONE POST-INTERVENTO	RISPARMIO ANNUO DI GESTIONE	COSTO TOTALE INTERVENTO	TEMPO DI RITORNO SEMPLICE
€ 100.850	€ 61.703	€ 39.147	€ 983.590	26 anni

Tali dati numerici portano quindi a considerare come un intervento di questo tipo, effettuato nell'anno corrente 2015, senza il supporto di incentivi statali, verrebbe ammortizzato nel 2041, quando il fabbricato avrebbe raggiunto un'età di 66 anni, prossima allo scadere della vita utile media del fabbricato in conglomerato cementizio armato prefabbricato.

Un tempo di ritorno semplice pari a 26 anni risulta elevato per interventi svolti sul patrimonio edilizio recente realizzato intorno al 1975 in conglomerato cementizio armato che, dopo una vita utile media variabile dai 50 ai 100 anni, a seconda del tipo di materiale, risulta significativamente degradato.

In conclusione, i risultati di queste analisi dimostrano che intervenire sull'involucro edilizio porta a notevoli guadagni in termini di fabbisogno energetico e che una accurata scelta della tipologia di intervento, del sistema costruttivo e dei materiali è necessaria affinché la realizzazione stessa del miglioramento dell'involucro sia sostenibile economicamente.



[Fig. 4, 5] Analisi della Scuola Media Dozza, svolta con *ReGreeN-ver.1.0.6.xlsm* (*MyGreenBuildings*) e comparazione fra lo stato di fatto, la soluzione progettuale che prevede di intervenire soltanto sull'involucro opaco (confronto 1), e l'ipotesi finale che comprende involucro opaco e trasparente (confronto 2): (in alto) grafico relativo alla dispersione energetica per trasmissione [kWh/m²anno] attraverso le diverse chiusure e partizioni; (in basso, a sinistra) risparmio percentuale annuo nei costi di gestione dell'edificio; (in basso, a destra) costo annuo di gestione dell'edificio [€].

La scelta di non intervenire sugli impianti mette in evidenza ulteriormente le potenzialità e le criticità degli interventi di miglioramento circoscritti all’involucro, sottolineando quali soluzioni siano valide, pur necessitando di una attenta revisione, finalizzata alla riduzione dei costi di realizzazione. Occorre comunque tenere in considerazione che la scelta di non intervenire sul sistema impiantistico impedisce il raggiungimento delle più alte classi energetiche.

Nel caso di studio specifico, l’intervento di recupero proposto per la riqualificazione dell’involucro edilizio della Scuola Media “Dozza” risulterebbe sostenibile soltanto a fronte del ricevimento di incentivi statali dedicati alle scuole pubbliche, che ridurrebbero il tempo di ritorno a circa 11 anni, accettabile per lo svolgimento di interventi di tale portata.

Il proposito di realizzare un involucro continuo integrato, andando oltre la tradizionale concezione di sistema di isolamento termico a cappotto, incontra quindi un ostacolo di tipo economico che, specialmente in ambito di patrimonio edilizio pubblico, non può essere trascurato.

Attraverso le analisi svolte sulla base di costi stimati con riferimento agli attuali prezzi di mercato dei componenti edili, si dimostra che un intervento di questo tipo, nonostante porti a un effettivo miglioramento in termini energetici, architettonici ed estetici, comporti una spesa economicamente poco sostenibile, in quanto si avvale di materiali che, seppure riciclati, necessitano di tecnologie moderne ancora poco sviluppate. Pertanto, stando allo stato dell’arte delle attuali tecnologie e al valore di mercato attuale dei materiali previsti dalla soluzione progettuale proposta, attualmente questo intervento comporterebbe una spesa non sostenibile per l’ente gestore comunale verso una serie di fabbricati appartenenti al patrimonio edilizio pubblico.

Tuttavia, sulla base del rapido sviluppo di questi strumenti di produzione dei componenti edili mediante *3D Printing*, che rappresentano la voce più incidente sul bilancio costi-benefici dell’intervento di recupero proposto, è possibile avanzare alcune considerazioni interessanti in merito a un probabile progressivo sviluppo di questo tipo di tecnologia.

Infatti, alla luce delle recenti esperienze di ricerca e dei notevoli progressi che vengono compiuti in questo ambito per giungere a una sempre maggiore accessibilità di questi strumenti, è altamente presumibile che nel giro di pochi anni questi costi possano essere abbattuti notevolmente, grazie alla rapida diffusione delle tecnologie di *3D Printing* che verranno sempre più impiegate anche nel settore edile.

Inoltre, così come la tecnologia del *3D Printing* è in continua evoluzione, anche i materiali usati per questo tipo di produzione sono in continuo sviluppo e sperimentazione. Attualmente i materiali maggiormente utilizzati sono polimeri termoplastici, ma gli attuali progressi che quotidianamente vengono compiuti dagli enti di ricerca e dalle maggiori sedi produttrici di stampanti 3D lasciano intravedere concretamente un notevole ampliamento delle possibilità produttive in termini di varietà di materiali e di prestazioni di resistenza meccaniche degli stessi.

In quest’ottica futura, la soluzione proposta acquista ulteriore valore, in termini di sua effet-

tiva adozione e applicabilità nell'ambito degli interventi di Recupero ed efficientamento energetico del patrimonio edilizio recente, secondo i criteri sostenibili ed ecocompatibili che guidano l'intero processo progettuale integrato, proposto dal presente progetto di ricerca.

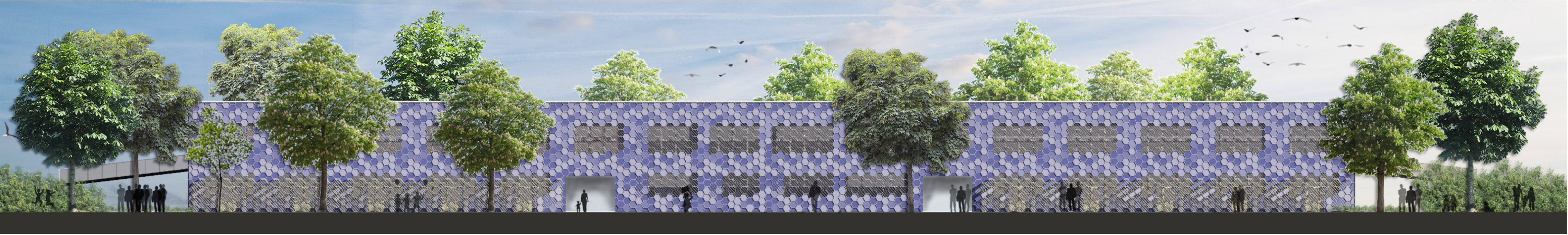
V.2 TAVOLE DI PROGETTO

All'interno di questo paragrafo si riportano le tavole grafiche di progetto dell'intervento di riqualificazione della Scuola Media “Dozza”, comprendenti i seguenti contenuti:

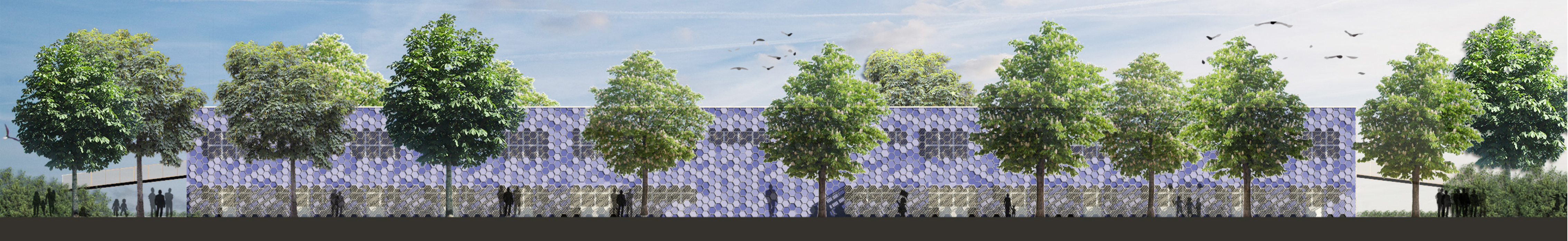
1. Prospetti longitudinali (1:200);
2. Prospetto trasversale (1:100);
3. Vista prospettica - Estate;
4. Vista prospettica - Inverno;
5. Dettaglio costruttivo - Componente di facciata (1:12);
6. Dettaglio costruttivo - Nodo tra muro e copertura (1:10);
7. Dettaglio costruttivo - Nodo tra muro e finestra (sezione verticale) (1:10);
8. Dettaglio costruttivo - Nodo tra muro e finestra (sezione orizzontale) (1:10);
9. Dettaglio costruttivo - Attacco a terra (1:10).

Fronte ovest - Accesso alla scuola

200 cm scala 1:200

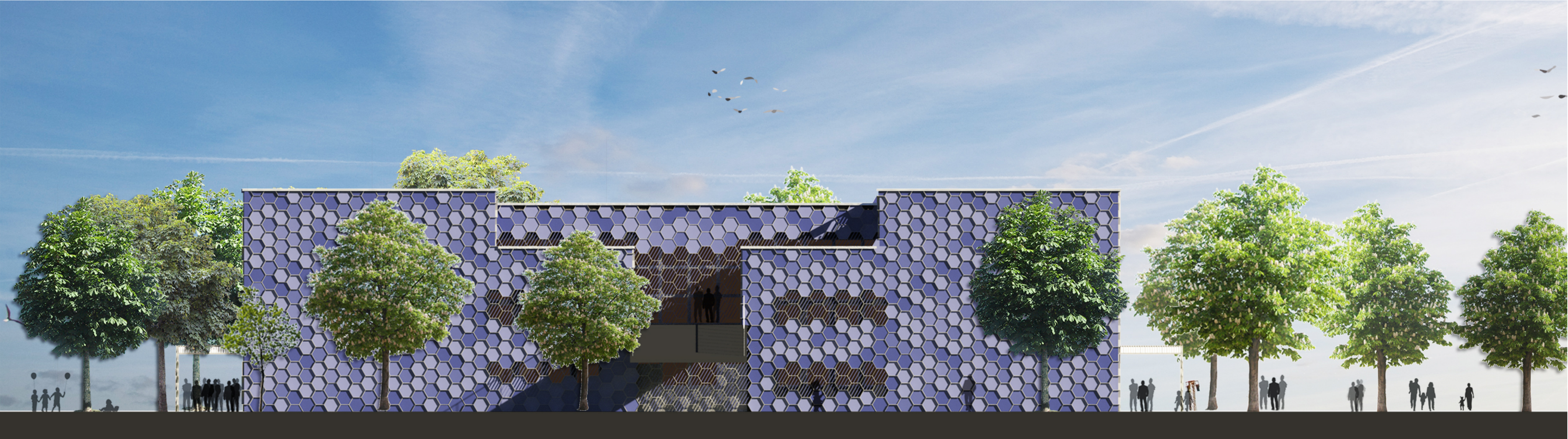


Fronte est - Area verde di ricreazione



Fronte nord

100 cm scala 1:100



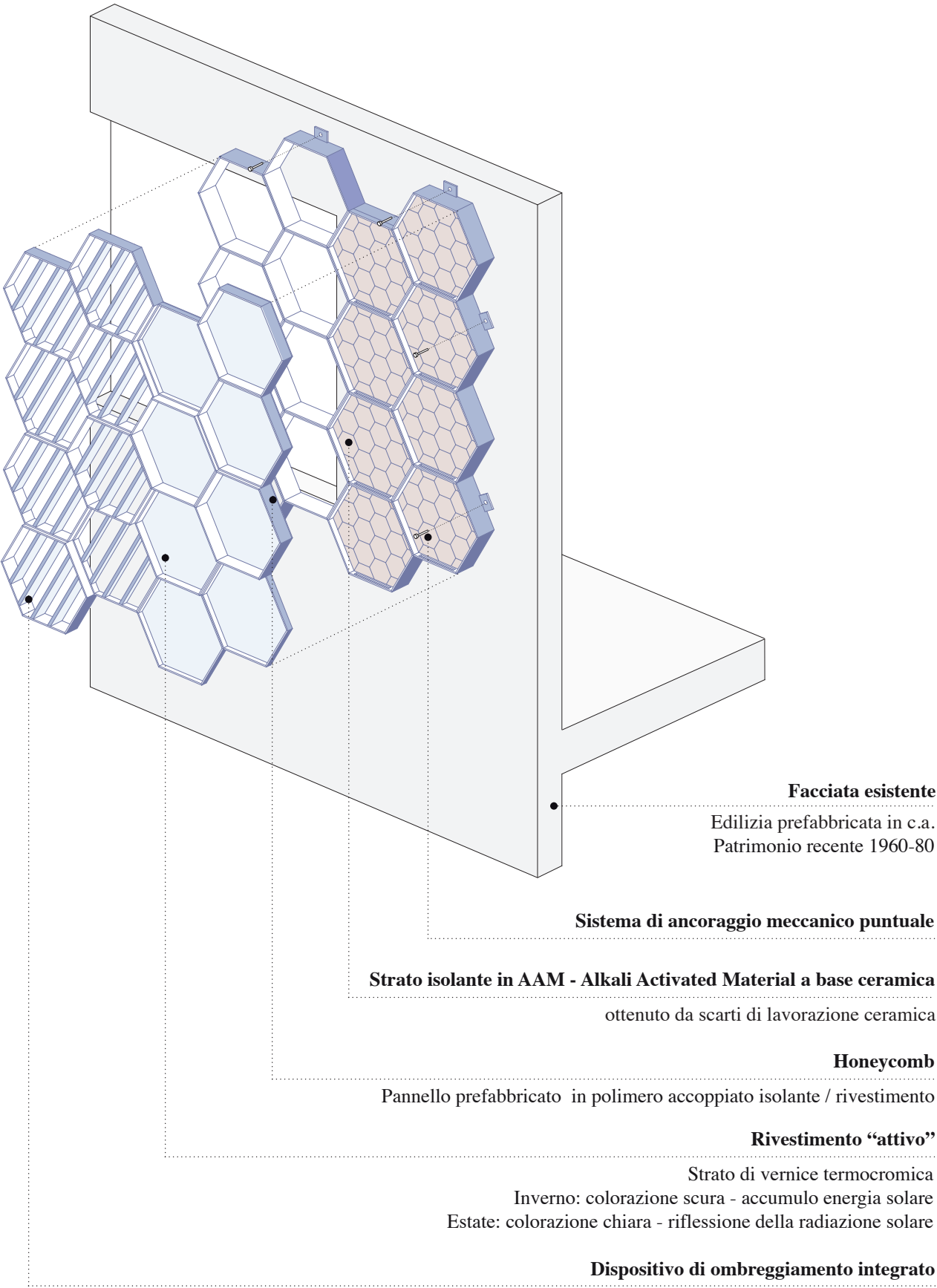
Vista nord-est



Vista nord-ovest



Esploso assonometrico



Sezione verticale

10 cm scala 1:12

Sistema di ancoraggio meccanico puntuale

Ancoranti metallici (tipo Fisher FAZ II 10/10)
di ancoraggio alla facciata esistente

Honeycomb

Pannello prefabbricato in polimero accoppiato
isolante / rivestimento
(realizzato con unica stampa, mediante 3D Printer)
con fazzoletti per ancoraggio e distanziatori per
camera di microventilazione (4 cm)

Rivestimento “attivo”

Strato di vernice termocromica (s = 1 cm)
Proprietà ottiche variabili in funzione della
variazione di temperatura esterna

Dispositivo di auto-ombreggiamento

integrato nel componente di facciata
di profondità variabile (4-6-8-10 cm)

Camera di microventilazione

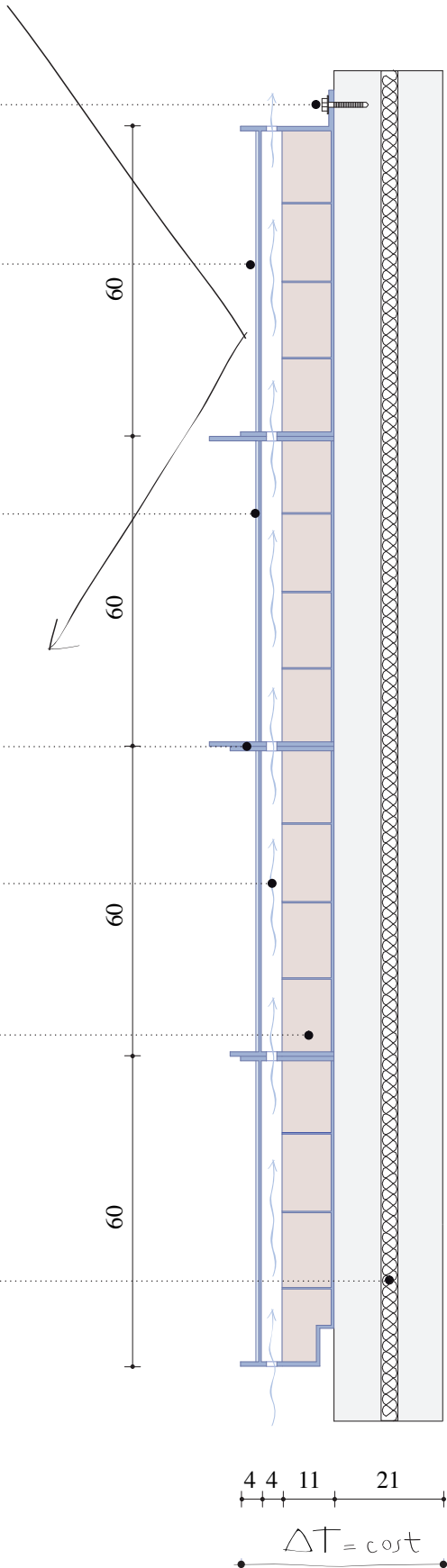
integrata nel componente di facciata (s = 4 cm)

Strato isolante in AAM - Alkali Activated Material (10 cm)

Materiale isolante ottenuto da scarti di produzione
Contenuti della malta:
- polvere di laterizio
- sabbia normalizzata (UNI EN 196-1)
- soluzione alcalina
- agenti aeranti

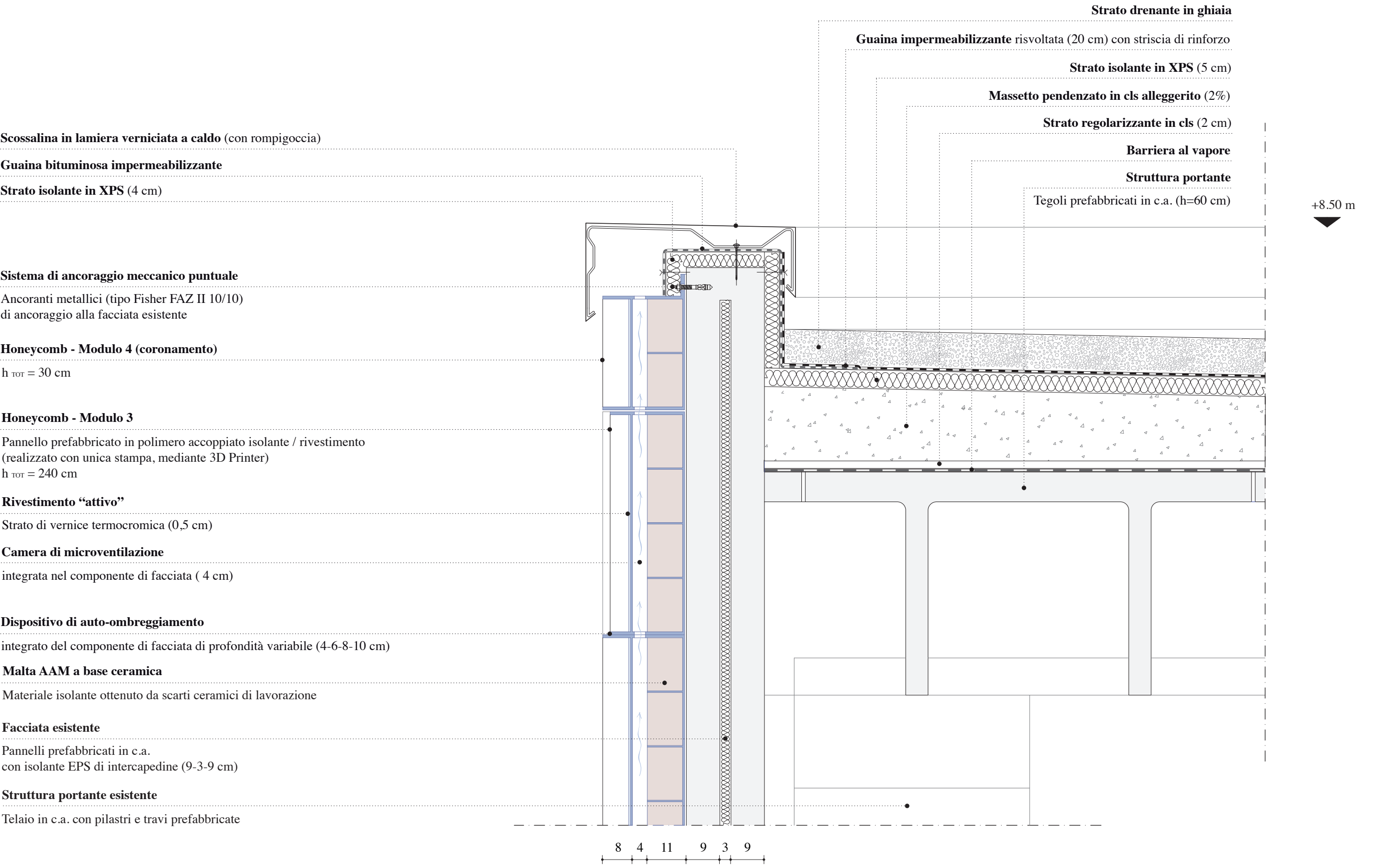
Facciata esistente

Patrimonio edilizio recente 1960-80
Pannelli prefabbricati in c.a.



Sezione verticale

10 cm scala 1:10



Sezione verticale

10 cm scala 1:10

Honeycomb - Modulo 7

Pannello prefabbricato in polimero accoppiato isolante / rivestimento termocromico con brise soleil integrati inclinati per l’ottimizzazione dell’illuminazione naturale (realizzato con unica stampa, mediante 3D Printer)
h_{TOT} = 240 cm)

Tassello di ancoraggio meccanico puntuale

Pannello di rivestimento in lamiera (verniciato a caldo)

Strato isolante in XPS (4 cm)

Dispositivo di ombreggiamento integrato

Componente esagonale con lamelle inclinate fisse (orientabili in fase di progettazione parametrica)

Finestra

Infisso in PVC con doppio vetro camera (4-12-4 cm)

Pannello di rivestimento in lamiera (verniciata a caldo)

Guaina impermeabilizzante

Strato isolante in XPS (4 cm)

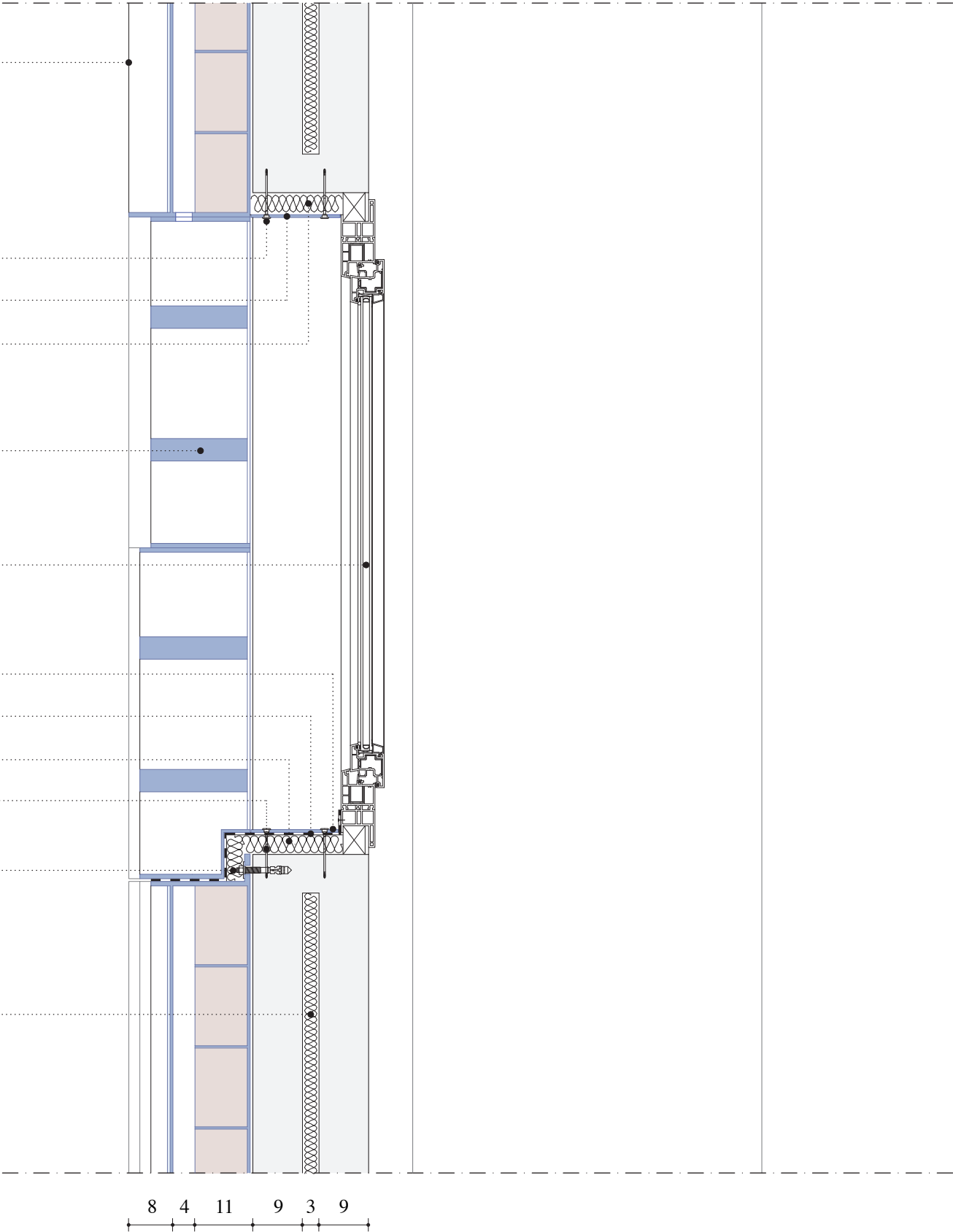
Tassello di ancoraggio meccanico puntuale

Sistema di ancoraggio meccanico puntuale

Ancoranti metallici (tipo Fisher FAZ II 10/10) di ancoraggio alla facciata esistente

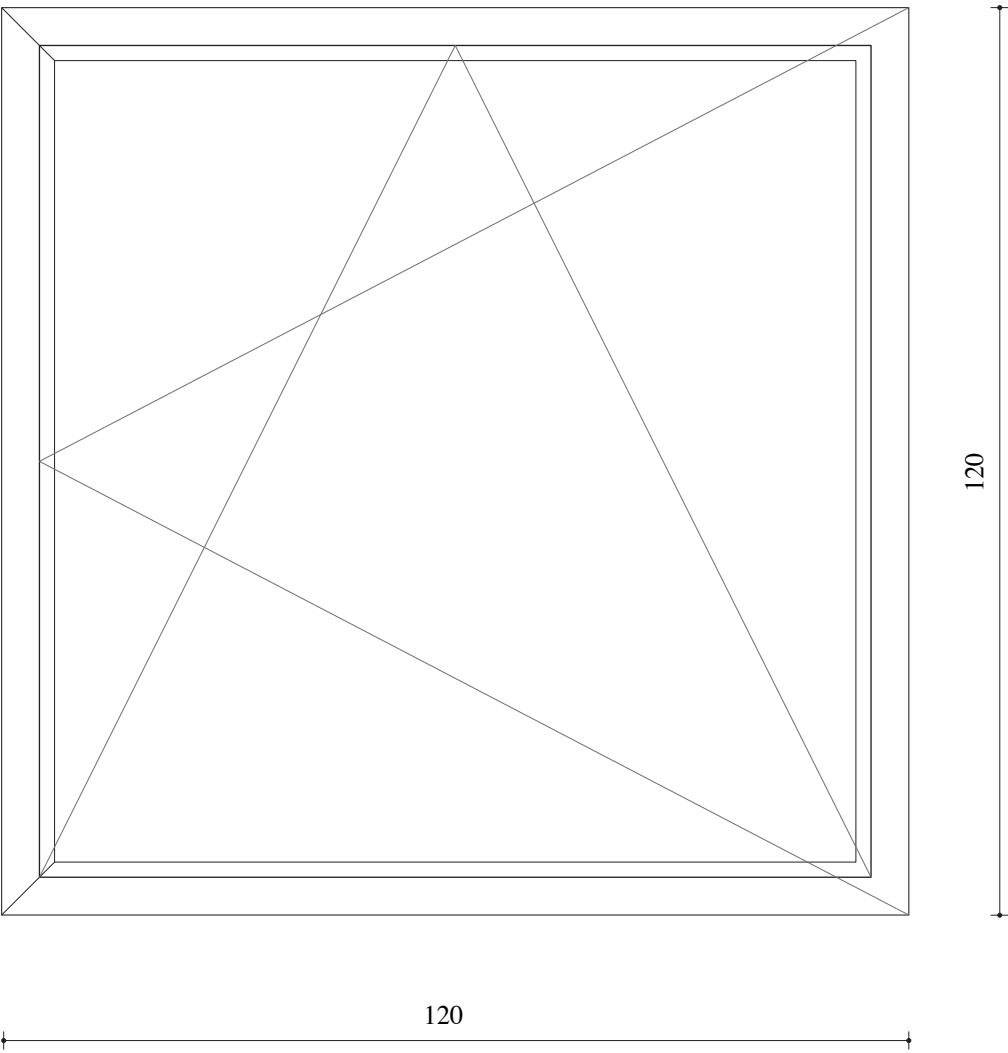
Facciata esistente

Pannelli prefabbricati in c.a. con isolante EPS di intercapedine (9-3-9 cm)

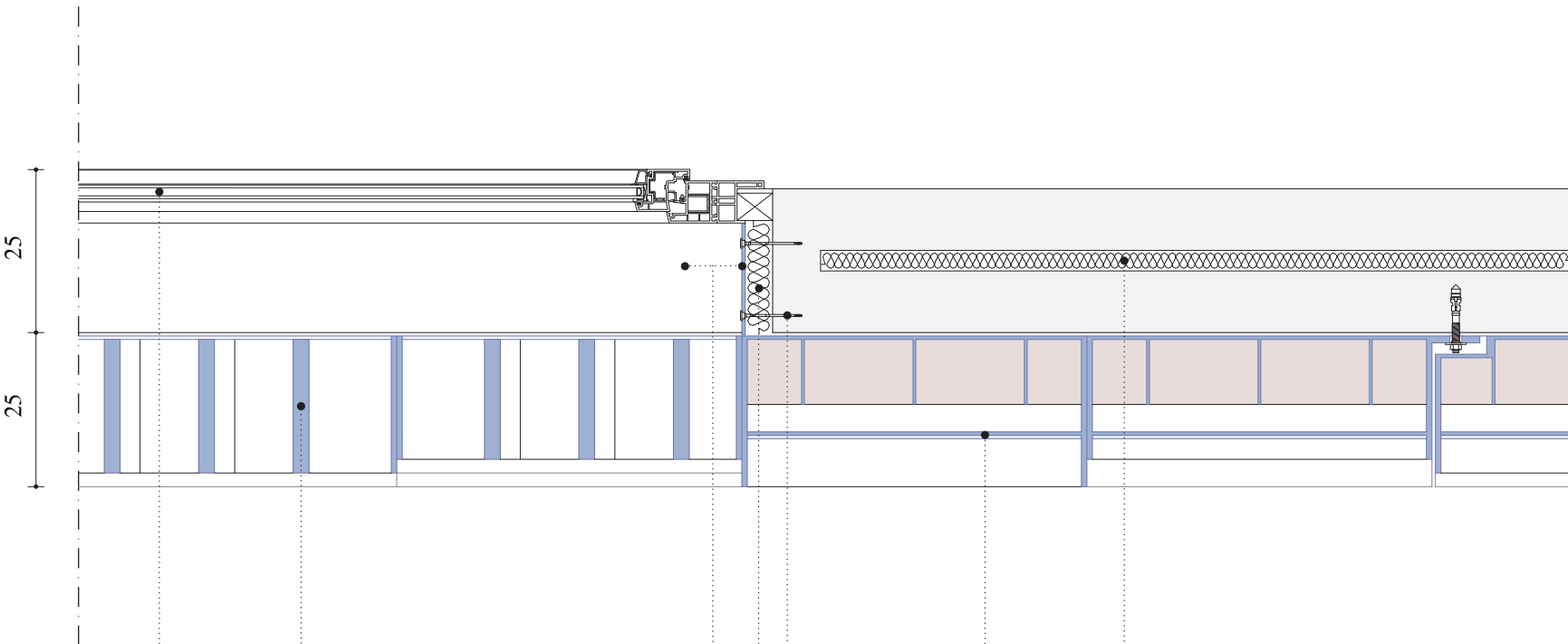


Sezione orizzontale

10 cm scala 1:10



Finestra ad anta vasistas con apertura verso l'interno (120x120 cm)



Facciata esistente

Pannelli prefabbricati in c.a.
con isolante EPS di intercapedine (9-3-9 cm)

Honeycomb - Modulo 6

Pannello prefabbricato in polimero
isolante / rivestimento termocromico
con brise soleil integrati inclinati
(realizzato con unica stampa, mediante 3D Printer)
h_{TOT} = 240 cm

Tassello di ancoraggio meccanico puntuale

Strato isolante in XPS (4 cm)

Pannello di rivestimento in lamiera (verniciata a caldo)

Dispositivo di ombreggiamento integrato

Componente esagonale con lamelle inclinate fisse
(orientabili in fase di progettazione parametrica)

Finestra ad anta vasistas

Infisso in PVC con doppio vetro camera (4-12-4 cm)

Sezione verticale

10 cm scala 1:10

Honeycomb - Modulo 7

Pannello prefabbricato in polimero
isolante AAM / rivestimento termocromico

Facciata esistente

Pannelli prefabbricati in c.a.
con isolante EPS di intercapedine (9-3-9 cm)

Struttura portante esistente

Telaio in c.a. con pilastri e travi prefabbricate

Scossalina in lamiera (con rompigoccia)

ancorata puntualmente con tassello

Tubazioni per il drenaggio (Ø20)

delle acque di falda e meteoriche

Strato di ghiaia drenante

Terreno di riempimento e manto erboso

Massetto in cls alleggerito

Tessuto non tessuto

Blocchi in cls cellulare

Guaina bituminosa impermeabilizzante

Isolante termico controterra in XPS (8 cm)

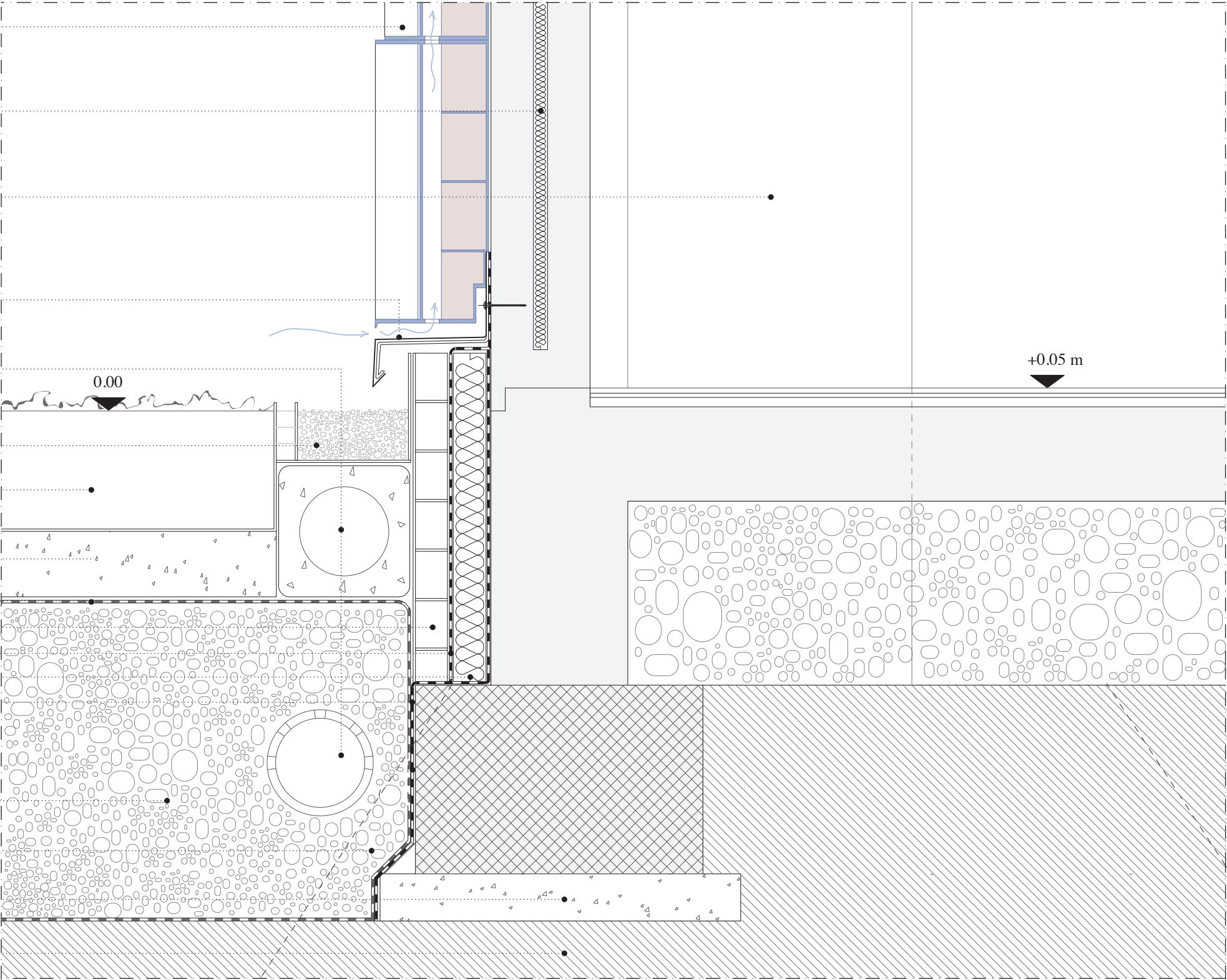
Guaina bituminosa impermeabilizzante

Vespaio in ghiaia

Plinto di fondazione in c.a.

Magrone (10 cm)

Terreno



Conclusioni
Conclusions

I ESITI FINALI

Nell'ambito degli interventi di Recupero del patrimonio edilizio esistente, il progetto di ricerca si dedica allo studio dei sistemi di efficientamento energetico degli edifici che presentano significative carenze dal punto di vista prestazionale ed estetico-architettonico.

Tra le diverse strategie di intervento, il progetto si orienta verso l'addizione in facciata, e quindi verso la riqualificazione del componente edile di involucro, al quale viene attribuito il ruolo di filtro "attivo" che, grazie alla sua composizione costruttiva, sia in grado di interagire sinergicamente con l'ambiente circostante, al fine di conseguire buoni livelli di prestazioni termiche e comfort abitativo.

In particolare, la ricerca si riferisce a un selezionato repertorio di scuole secondarie di primo grado (ex Scuole Medie) situate nel territorio di Bologna, realizzate fra il 1940 e il 1990, prevalentemente mediante le tecniche moderne di prefabbricazione in conglomerato cementizio armato, per la realizzazione di telai e pannelli di tamponamento. Nel tempo, la maggior parte di questi edifici, affidati alla gestione del Comune, non ha subito sostanziali trasformazioni e adeguamenti, presentando allo stato attuale molteplici problematiche legate principalmente alla sicurezza statica, al comportamento energetico, al comfort ambientale interno e alle qualità estetico-architettoniche.

Ai fini dello sviluppo del progetto di ricerca, volto alla definizione di un approccio innovativo per intervenire sull'involucro edilizio del costruito mediante un processo integrato, gli edifici scelti offrono notevoli potenzialità per lo sviluppo di soluzioni costruttive di facciata. Infatti, si tratta di fabbricati che, per la loro destinazione d'uso, la diffusa neutralità architettonica, la semplice volumetria e il ridotto numero di livelli (uno o due piani) che li caratterizzano, forniscono un ottimo punto di partenza per l'esplorazione e lo sviluppo di ricerche morfologiche e geometriche volte alla definizione di una nuova superficie di involucro.

In questo contesto, la ricerca si focalizza su un nuovo tipo di approccio al disegno di facciata, modulata da morfologie che consentano di superare l'impiego diffuso di criteri compositivi basati sulla semplificazione formale delle soluzioni architettoniche, rivolgendo lo sguardo verso lo studio di strumenti e metodi per l'elaborazione di forme più complesse, adattabili alla configurazione tipologica esistente, a costituire un nuovo involucro edilizio continuo, progettato "su misura".

L'esplorazione di soluzioni di involucro, così concepite, si orienta verso strutture sostenibili ed ecocompatibili, realizzate con materiali innovativi di riciclo, a matrice rinnovabile, abbinate anche all'uso di cromie per la riqualificazione energetica e la valorizzazione architettonica del patrimonio edilizio mediante tecniche costruttive a basso impatto ambientale. Le due soluzioni progettuali presentate, elaborate a partire dagli stessi paradigmi di ricerca, sono esposte in questa sede a titolo esemplificativo del processo progettuale proposto dalla Tesi.

In linea con le istanze e gli obiettivi di ricerca esposti, la Tesi illustra e dimostra il processo progettuale proposto per accompagnare progettisti ed operatori verso la conduzione degli interventi di recupero del costruito, a partire dall'analisi, fino al progetto e alla sua realizzazione finale, affrontandolo in ogni sua parte all'interno dei capitoli presentati, strutturati secondo due parti distinte.

Tale struttura della Tesi rispecchia la suddivisione del processo innovativo proposto per lo svolgimento di interventi di recupero, articolato secondo una serie di fasi che, grazie al supporto di strumenti e software digitali, prevedono di gestire il passaggio dalla fase preliminare di rilievo metrico e descrittivo dello stato di fatto, alla fase di progettazione parametrica e produzione dei componenti di involucro, fino ad arrivare alla posa in opera finale del sistema costruttivo.

Durante la *Parte I - Materiali e tecniche*, dopo una analisi critica dello stato dell'arte dei sistemi tecnologici attuali per il recupero dell'involucro edilizio e dei materiali isolanti presenti sul mercato per l'efficientamento energetico, la Tesi illustra l'approccio innovativo promosso. La reale applicazione del processo integrato proposto è dimostrata mediante l'elaborazione di due particolari soluzioni progettuali di involucro, accomunate dai medesimi paradigmi di ricerca, dagli stessi principi geometrici e costruttivi, oltre che dall'impiego dello stesso materiale innovativo isolante e massivo, riciclato ed ecosostenibile. Lo studio di ogni soluzione di involucro è svolto secondo un metodo che prevede la progettazione parametrica di un sistema "su misura", l'analisi termica e meccanica, la prototipazione e sperimentazione costruttiva, e la verifica delle tecniche di messa in opera e dei requisiti prestazionali, grazie al confronto tra i dati teorici e quelli sperimentali.

La formulazione di queste due soluzioni progettuali di involucro assume un ruolo fondamentale all'interno della *Parte II - Analisi e progetto*, per illustrare l'applicazione del processo progettuale, continuo e integrato, proposto per la riqualificazione delle facciate esistenti, supportato dall'impiego di macchine a controllo numerico CNC con interfaccia CAD-CAM per la fabbricazione digitale degli elementi progettati, passando così dal modello virtuale a quello reale. In particolare, la Tesi si concentra sul patrimonio edilizio scolastico recente (1960-80) del Comune di Bologna che, grazie alla semplicità e impersonalità delle caratteristiche volumetriche e costruttive imposte dalla tecnica prefabbricata con cui è stato prevalentemente realizzato, costituisce il campione ideale per lo sviluppo della ricerca presentata nel lavoro di Tesi.

L'esito finale del progetto di ricerca non riguarda tanto la redazione di linee guida di riferimento per lo svolgimento di interventi di recupero, già formulate da precedenti Tesi di Dottorato, né l'elaborazione di due specifiche soluzioni progettuali di involucro, che naturalmente necessiterebbe di ulteriori verifiche e sperimentazioni per la verifica e la messa a punto dei sistemi costruttivi.

Il progetto è volto bensì alla presentazione di un nuovo approccio integrato per la gestione dell'intero processo progettuale, durante le fasi di analisi, progetto ed esecuzione, nell'ambito degli interventi di recupero sul patrimonio edilizio esistente.

In relazione agli obiettivi secondari della ricerca, espressi all'interno dell'*Introduzione*, gli esiti finali della ricerca sono i seguenti:

- **ricognizione dello stato dell'arte** dei sistemi costruttivi di involucro esistenti e dei materiali isolanti presenti sul mercato edile, al fine di individuarne le criticità e le potenzialità, a partire dalle quali elaborare riflessioni e nuove soluzioni tecnologiche (*Capitolo I. Stato dell'arte*);
- **definizione di criteri e strategie sostenibili ed ecocompatibili** di riferimento per interventi di riqualificazione fondati sull'assemblaggio a secco di elementi prefabbricati, per la realizzazione di involucri che rispondano ai requisiti prestazionali normativi e alle esigenze dell'utenza di flessibilità e comfort (*Capitolo I. Stato dell'arte*);
- **caratterizzazione di un materiale isolante innovativo** geopolimerico, attivato alcalinamente (AAM - *Alkali Activated Material*), ottenuto dal riciclo di scarti di produzione del laterizio, a basso impatto ambientale, dotato di una conducibilità termica ridotta e di una elevata inerzia termica. In particolare, il materiale termico isolante geopolimerico AAM studiato presenta le seguenti proprietà: densità $d = 200 \text{ kg/m}^3$, coefficiente di conducibilità $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$, calore specifico $c_s = 1.080 \text{ J/kgK}$, coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo $\mu = 5$, resistenza meccanica a compressione $R_c = 3,5 \text{ MPa}$. Si dimostra che l'applicazione di uno strato esterno di circa 8-10 cm di isolante in malta AAM conferisce all'involucro esistente buoni valori di trasmittanza termica stazionaria U e periodica Y_{IE} e di capacità termica areica interna periodica C_{ip} , e dunque buone prestazioni in termini di proprietà energetiche e comfort abitativo (*Capitolo III. Sperimentazione costruttiva*);
- **classificazione delle specificità tipologico-costruttive e delle principali carenze prestazionali** presentate attualmente dal tipo di patrimonio edilizio scolastico oggetto di studio, in relazione alla vulnerabilità sismica e all'inefficienza energetica (*Capitolo IV. Un caso di studio. Il patrimonio edilizio scolastico di Bologna*);
- **redazione di schede tecniche anagrafiche e di rilievo delle scuole secondarie di primo grado di Bologna**, al fine di costituire un quadro anagrafico completo del patrimonio edilizio scolastico esistente a cui sono rivolti gli interventi di recupero esplorati (*Appendice - Schede anagrafiche e di rilievo*).

In rapporto agli obiettivi principali della ricerca, i risultati finali ottenuti sono i seguenti:

- **elaborazione di processi e metodi per la riqualificazione dell'involucro secondo un nuovo approccio integrato** per la gestione degli interventi di recupero del costruito mediante soluzioni di facciata "su misura", supportata dall'impiego di software parametrici e macchine a controllo numerico CNC, con interfaccia CAD-CAM, per la fabbricazione digitale degli elementi progettati (*Capitolo II. Processi e metodi per la riqualificazione dell'involucro*);
- **formulazione e prototipazione di due soluzioni progettuali di involucro**, a titolo dimo-

strativo dell'applicazione del processo progettuale proposto per la riqualificazione delle facciate esistenti (*Capitolo III. Sperimentazione costruttiva*);

- **elaborazione di un progetto di intervento per il recupero della Scuola Media “Dozza”**, mediante l'impiego del sistema di involucro *G-SKinnED*, basato sull'assemblaggio a secco di pannelli prefabbricati composti da una struttura a trama esagonale realizzata con stampante 3D, comprendenti uno strato di materiale termico isolante innovativo in AAM, accoppiato a uno strato di rivestimento e protezione dagli agenti atmosferici, di supporto per la posa di un dispositivo attivo a base di vernice termocromica. In particolare, per il caso di studio specifico della Scuola Media “Dozza”, le simulazioni svolte in regime dinamico dimostrano che l'applicazione dell'intervento *G-SKinnED* sull'involucro opaco (escludendo qualsiasi altro intervento sull'involucro trasparente e sugli impianti), porta da un valore iniziale non regolamentare di trasmittanza termica stazionaria $U = 0,927 \text{ W/m}^2\text{K}$, fornito dalla parete perimetrale esistente in doppio strato di conglomerato cementizio armato con intercapedine isolante in polistirene (spessore totale 21 cm), a una struttura regolamentare caratterizzata da un valore di $U = 0,325 \text{ W/m}^2\text{K}$, nel rispetto del *D.lgs 29 dicembre 2006, n. 311*, che impone una U limite di $0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$. Inoltre, si passa da un valore scadente di trasmittanza termica periodica $Y_{IE} = 0,5300 \text{ W/m}^2\text{K}$, a un valore buono pari a $0,0319 \text{ W/m}^2\text{K}$, inferiore al limite imposto dal *D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59*, pari a $0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le pareti opache verticali, orizzontali o inclinate, per le località più soleggiate. Infine, mediante questo intervento, viene rispettato anche il valore della capacità termica areica di $C_{ip} = 113,63 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, che supera abbondantemente il limite indicato di $C_{ip} \geq 50$ per $Y_{IE} \leq 0,04$. Abbinando all'intervento sull'involucro opaco un intervento di riqualificazione delle porzioni trasparenti dell'involucro, mediante la sostituzione degli infissi e dei vetri con elementi maggiormente performanti, si può dire che, in definitiva, l'intervento contribuisce notevolmente all'efficientamento energetico dell'edificio oggetto di studio (*Capitolo V. Il progetto di intervento per la Scuola Media “Dozza”*).

In particolare, sulla base delle analisi condotte e delle sperimentazioni svolte, che rappresentano il momento ultimo di confronto e verifica dei requisiti prestazionali e delle modalità di messa in opera, si possono trarre importanti conclusioni in merito alle due soluzioni progettuali presentate all'interno della Tesi.

Il primo sistema, costituito da cubi autobloccanti *TIM - Topologically Interlocked Materials*, realizzati in materiale coibente e massivo AAM, è sviluppato presso la sede francese di cotutela *Laboratoire GSA de l'ENSA Paris-Malaquais*. Le analisi meccaniche e termiche sono svolte sul modello geometrico realizzato con il software parametrico-variazionale *Wolfram Mathematica*, successivamente importato all'interno del software *Cast3M 2000* per lo svolgimento di analisi agli elementi finiti. I dati teorici provenienti da queste analisi, validati dai dati sperimentali ottenuti dal-

le prototipazioni, dimostrano le buone proprietà di resistenza meccanica e termica del sistema isolante, caratterizzato da un disegno di facciata geometrico e chiaroscurale suggestivo. Nonostante le potenzialità emerse dal sistema di pannellatura in cubi autobloccanti, le sperimentazioni costruttive hanno messo in luce le criticità legate non tanto all'assemblaggio dei conci che, se configurati mediante l'impiego di macchine a controllo numerico CNC, consentono un rapido montaggio e una buona qualità dell'esito estetico finale, quanto al sistema di ancoraggio puntuale del sistema prefabbricato alla facciata esistente. Pertanto, stando allo stato dell'arte attuale delle ricerche, la reale applicabilità del sistema negli interventi di recupero dell'involucro risulterebbe eccessivamente onerosa in termini di tempo, risorse economiche e impiego di mano d'opera specializzata.

Il secondo sistema di involucro, denominato *G-SKinnED (Geopolymers-Sustainable Key for an innovative Envelope Design)*, è studiato invece presso il *CIRI Edilizia e Costruzioni* dell'Università di Bologna. Le sperimentazioni svolte in ambito di ricerca di un materiale innovativo in grado di rispondere ai requisiti di sostenibilità portano a confermare le proprietà della malta geopolimerica AAM, ottenuta da sfridi di laterizio, uniti a una soluzione alcalina e ad agenti aeranti per l'ottimizzazione del peso e del potere isolante. Da questo processo e da questa materia prima si ottiene un materiale inorganico, plastico, riciclato, a basso impatto ambientale, versatile dal punto di vista delle possibili applicazioni e ottimizzazioni della formulazione.

Le analisi termiche sono state svolte sul modello geometrico ottenuto mediante l'utilizzo del software di progettazione parametrica *Rhinoceros+Grasshopper*, connesso ai programmi di analisi ambientale *Ecotect Analysis* e di analisi energetica *DesignBuilder+EnergyPlus*. I risultati ottenuti da tali simulazioni energetiche in regime dinamico dimostrano che questa soluzione porta a raggiungere un buon comportamento energetico, in termini di isolamento e inerzia termica, di controllo della temperatura superficiale di facciata, e dunque di benessere abitativo. I dati teorici ottenuti dalle simulazioni svolte dimostrano che l'intervento elaborato, proposto dal progetto di ricerca per il caso specifico di studio, porta a effettivi guadagni in termini di fabbisogno energetico, oltre che di qualità estetica e architettonica, a fronte però di un costo totale di intervento particolarmente elevato, in rapporto al tempo di ritorno semplice.

Infatti, l'analisi dei costi-benefici, svolta sulla base dei valori di mercato per i componenti edili, già presenti in commercio, e sulla base della stima dei prezzi degli elementi, tuttora oggetto di ricerca, dimostra che tale intervento comporta una spesa economicamente poco sostenibile per l'ente gestore (in questo caso, il Comune di Bologna), in quanto si avvale di materiali che, seppure riciclati, necessitano di tecnologie moderne ancora poco sviluppate, quali *3D Printing*. Tuttavia, sulla base del progressivo sviluppo degli strumenti di produzione basati sulla stampa digitale, che rappresentano la voce maggiormente incidente sul bilancio costi-benefici dell'intervento di recupero proposto, è possibile ipotizzare una riduzione sensibile dei costi relativi all'applicazione di questa tecnologia nel settore edile.

Sulla base di queste considerazioni, si può ipotizzare che, in un futuro molto prossimo, l'attuazione di un intervento di questo tipo possa raggiungere prezzi maggiormente accessibili che, a fronte di una spesa ammortizzabile in pochi anni, consenta di ottenere i miglioramenti previsti mediante l'impiego di questa soluzione di involucro:

- *riqualificazione architettonica* e personalizzazione degli edifici scolastici prefabbricati, mediante un disegno di facciata in grado di superare la spiccata orizzontalità e l'amorfa serialità dei prospetti, grazie all'utilizzo di cromie e ombre variabili durante l'arco del giorno e dell'anno;
- *miglioramento prestazionale energetico*, attraverso la progettazione customizzata di un componente di facciata, in grado di controllare la radiazione solare in termini di proprietà termiche e di integrazione con dispositivi di ombreggiamento, al fine di contribuire sinergicamente alla riduzione dei consumi energetici dell'edificio.

La possibilità di gestire la totalità di questi fattori secondo un nuovo approccio integrato alla progettazione degli interventi sul costruito, mediante la connessione di diversi software di programmazione parametrica, costituisce un potenziale notevole per la realizzazione di involucri architettonici progettati "su misura", sulla base delle specificità morfologiche e costruttive di ogni singolo fabbricato, facilmente riproducibili mediante le moderne tecnologie di produzione e stampa digitale.

II SVILUPPI FUTURI DELLA RICERCA

Sulla base dei risultati ottenuti e dell'analisi di criticità e potenziali individuati nelle due soluzioni progettuali di involucro proposte, è possibile prevedere sviluppi futuri della ricerca.

In particolare, per quanto riguarda il I Sistema innovativo di involucro, costituito da cubi autobloccanti *TIM - Topologically Interlocked Materials*, in seguito alle prototipazioni svolte, è possibile ipotizzare ulteriori sviluppi della ricerca volti a migliorare ulteriormente le proprietà di resistenza meccanica e integrità del sistema.

Uno dei primi interventi possibili riguarda l'aumento e l'ottimizzazione dei cavi di armatura e ancoraggio, ad esempio mediante l'inserimento di cavi orizzontali passanti per il baricentro dei conci cubici, in aggiunta a quelli disposti verticalmente, i quali contribuirebbero a eliminare le spinte e gli spostamenti dei singoli elementi, agendo a favore di una maggiore integrità del sistema. Un'ulteriore indagine potrebbe esplorare la possibilità di impiegare cavi realizzati con altri materiali che, a parità di resistenza meccanica, possano presentare un peso minore (quali cavi in nylon o in altri materiali polimerici, riciclabili).

Un ulteriore intervento che può contribuire a massimizzare la resistenza meccanica del sistema autobloccante TIM consiste nella pretensione dei tiranti verticali e orizzontali, le cui modalità di posa in opera ed efficacia possono essere ipotizzate e valutate durante ulteriori sperimentazioni costruttive realizzabili, supportate da analisi meccaniche svolte con appositi software, all'interno di futuri scenari di sviluppo della ricerca.

Infine, l'inserimento di giunti tra i blocchi costituirebbe un ulteriore accorgimento a favore della compensazione degli errori di fabbricazione dei singoli cubi e delle imprecisioni dovute all'assemblaggio e alla posa in opera: ulteriori ricerche potrebbero valutare il materiale maggiormente compatibile ed efficace con cui realizzare giunti caratterizzati da proprietà fisiche e meccaniche ottimizzanti la resistenza del sistema autobloccante.

Naturalmente, tutti questi interventi devono essere valutati non soltanto dal punto di vista teorico, in rapporto ai dati numerici ottenuti dalle analisi meccaniche, bensì anche in termini di modalità di assemblaggio e posa in opera, mediante prototipazioni e sperimentazioni costruttive.

Per quanto riguarda, invece, il II Sistema innovativo di involucro *G-SKinnED*, si possono avanzare alcune ipotesi di miglioramento delle prestazioni energetiche del componente di facciata, con particolare sguardo verso la possibilità di conferire ad esso un comportamento maggiormente "attivo" e sinergico con l'ambiente esterno.

Futuri sviluppi della ricerca prevedono l'ottimizzazione della formulazione del materiale isolante *AAM - Alkali Activated Material*, a base ceramica, costituito da polveri di laterizio ottenuti

da sfridi di lavorazione, unite a soluzioni alcaline e ad agenti aeranti. Prossime indagini e sperimentazioni costruttive verranno condotte al fine di individuare la formulazione ottimale del materiale innovativo proposto, in termini di proprietà termiche di isolamento e massività, così come di accessibilità del prodotto finale in termini di costi e risorse.

Inoltre, la dinamicità del componente di involucro progettato potrebbe essere migliorata grazie all'applicazione di uno strato ultimo di finitura costituito da vernice termocromica dotata di eccellenti proprietà fisiche e ottiche e di elevate capacità di reversibilità.

Grazie alla sue proprietà ottiche, il rivestimento termocromico assumerebbe una colorazione più scura durante l'inverno, consentendo di assorbire la radiazione solare e dunque di accumulare l'energia termica, mentre diventerebbe più chiaro durante l'estate, permettendo all'involucro di riflettere la radiazione solare e quindi di ridurre la sua temperatura superficiale. In questo modo, questa vernice consentirebbe di regolare la quantità di radiazione solare assorbita e riflessa, e dunque la quantità di energia termica accumulata durante i cicli giorno-notte ed estate-inverno da parte dello strato isolante di malta geopolimerica AAM e della parete perimetrale esistente.

Ricerche scientifiche sono ancora in atto per migliorare la durabilità di questo materiale che, attualmente, non è ancora presente sul mercato per il rivestimento esterno degli edifici, a causa delle criticità legate alla reversibilità dei pigmenti termocromici, fortemente minacciata dall'azione della radiazione solare. Una delle modalità possibili di risoluzione di questo problema consiste nel sottoporre i pigmenti termocromici a un particolare trattamento di microincapsulazione. Futuri sviluppi della ricerca possono dimostrare l'efficienza e l'efficacia della soluzione proposta, grazie alla messa a punto di una vernice cromogenica dotata di un dispositivo di protezione dei pigmenti termocromici per l'attenuazione del problema di fotodegradazione e, di conseguenza, per il miglioramento della reversibilità delle proprietà ottiche.

Attraverso la sinergica interoperabilità dei componenti di facciata, si prevede che la soluzione proposta possa dimostrarsi così in grado di ottimizzare le proprietà dell'involucro "attivo", capace di interagire con l'ambiente interno ed esterno, in relazione alla variabilità del contesto climatico e al grado richiesto di flessibilità delle sue capacità prestazionali.

Appendice - Schede anagrafiche e di rilievo
Annexe - Fiches anagraphiques et de relevé

SCUOLE SECONDARIE DI PRIMO GRADO (EX SCUOLE MEDIE) NEL COMUNE DI BOLOGNA

Si riportano di seguito le n. 21 schede relative alle scuole pubbliche secondarie di primo grado del Comune di Bologna, elaborate a partire dalle informazioni anagrafiche, geometriche, morfologiche, costruttive e strutturali raccolte durante le attività di sopralluogo e di ricerca di archivio dei documenti originali di progetto, attualmente depositati presso l'Archivio Regionale e l'Archivio Comunale di Bologna. Tutte queste attività sono state condotte durante il corso dell'anno 2012, cioè durante il primo anno di Dottorato di Ricerca.

Il lavoro di stesura e compilazione delle schede, svolto in collaborazione con il Comune di Bologna, rappresenta uno strumento di identificazione dei caratteri principali e di classificazione del patrimonio, al fine di fornire un quadro generale completo delle Scuole Medie. Le schede, infatti, forniscono una classificazione degli edifici in termini di dati anagrafici a livello architettonico e ambientale, in termini di caratteristiche morfologiche, costruttive e strutturali, e ancora in relazione allo stato conservativo. Esse costituiscono una base conoscitiva fondamentale per la gestione del patrimonio e la valutazione di interventi manutentivi volti al recupero dei fabbricati scolastici.

In particolare, ogni scheda è organizzata secondo la seguente struttura:

- Dati generali:
 - quartiere;
 - localizzazione rispetto alla città;
 - periodo di costruzione dell'edificio scolastico;
 - progettisti e imprese costruttrici;
 - eventuali lavori di ristrutturazione o ampliamento;
 - modello distributivo.
- Parametri climatici:
 - altitudine;
 - gradi giorno;
 - zona climatica;
 - vento;
 - orientamento;
- Caratteristiche morfologiche:
 - superficie;
 - numero di livelli e altezza piani;
 - volume riscaldato;
 - rapporto di forma S/V;
 - rapporto di finestratura;
- Caratteristiche costruttive e strutturali:

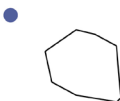
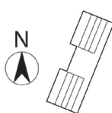
- tipologia strutturale;
- tipologia costruttiva (per ogni elemento costruttivo individuato);
- materiali impiegati (per ogni elemento costruttivo individuato);
- Stato conservativo:
 - fessurazioni;
 - lesioni (passanti e non passanti);
 - distacchi (passanti e non passanti);
 - cedimenti;
 - umidità;
 - infiltrazioni.
- Documentazione grafica di archivio;
- Documentazione fotografica di rilievo.

Le schede sono riportate secondo la suddivisione delle scuole per quartieri, seguendo l'ordine impiegato anche precedentemente nella tabella di sintesi:

1. Scuola "Volta";
2. Scuola "Testoni-Fioravanti";
3. Scuola "Panzini";
4. Scuola "Zappa";
5. Scuola "Salvo D'Acquisto";
6. Scuola "De Andrè - Ex Alighieri";
7. Scuola "Gandino";
8. Scuola "Dozza";
9. Scuola "Zanotti";
10. Scuola "Besta";
11. Scuola "Saffi";
12. Scuola "Guido Reni";
13. Scuola "Jacopo della Quercia";
14. Scuola "Irnerio";
15. Scuola "Rolandino de' Passeggeri";
16. Scuola "Pepoli";
17. Scuola "Leonardo Da Vinci";
18. Scuola "Guinizelli";
19. Scuola "Carracci";
20. Scuola "Farini";
21. Scuola "Guercino".

1. SCUOLE “VOLTA”



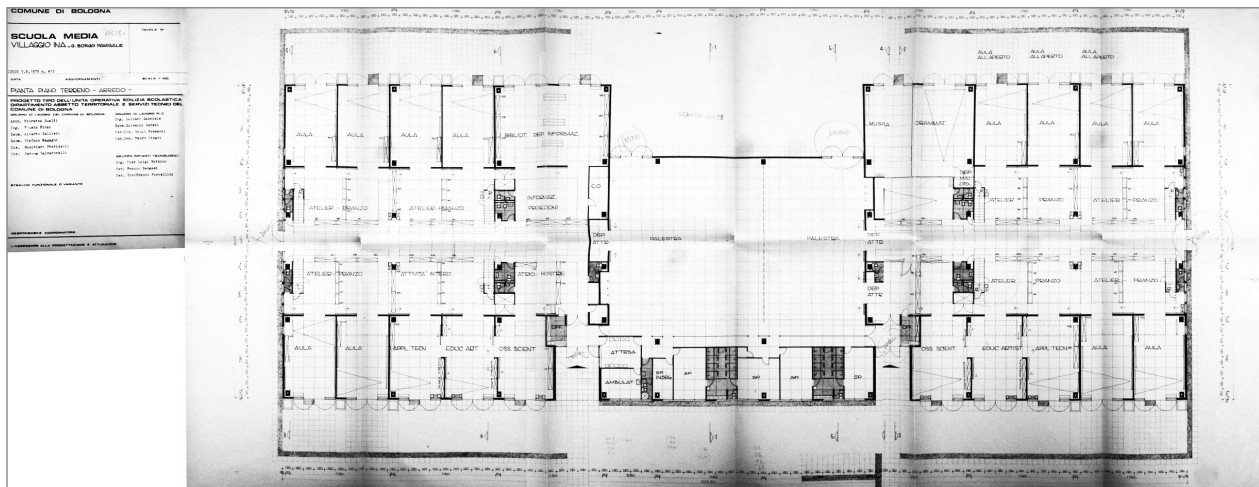
DATI GENERALI	
Nome	“Mazzini” (scuole primarie) - “Volta” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.14
Quartiere	Borgo Panigale
Indirizzo	via D. Biancolelli, 38/40
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1976-1978
Progettisti	Gruppi di Lavoro del Comune di Bologna (Arch. Gualdi, Ing. Finzi, Geom. Masi, Geom. Gallieri, Geom. Rivalta, Ing. Bottino)
Impresa costruttrice	Cooperativa EDILTER
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	2000 - Ripristino copertura 2012 - Intervento strutturale post-sisma
Modello distributivo	Unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2.259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	4.709
Altezza piano [m]	3,75
Volume netto riscaldato [m ³]	23.868
Volume lordo riscaldato [m ³]	23.842
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,44
Rapporto di finestratura	Alto

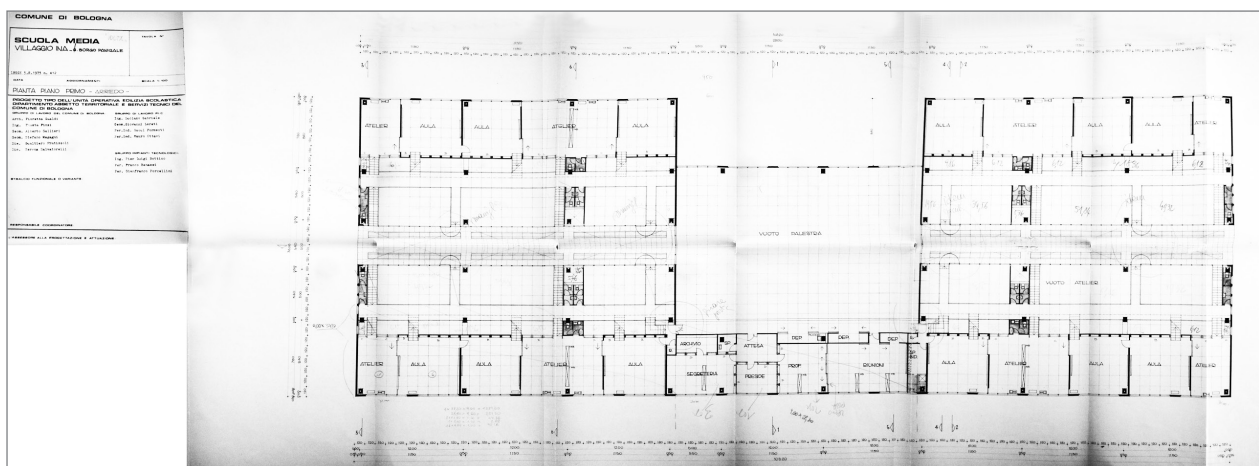
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio	Piastrelle 1 cm Soletta c.a. 20 cm Massetto 10 cm
	Piano primo	Tegolo prefabbricato	C.a.
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	C.a. prefabbricato Celenit 4 cm Guaina
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio di polistirolo	Strato in cls 6 cm Polistirolo 8 cm Strato in cls 6 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Vetro semplice / Doppio vetro / Doppio vetro con camera	Vetro 0,5 cm Infissi 7 cm Intercapedine 1 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale			●	●				●
Pilastrature d'angolo	●							
Tamponamenti esterni	●						●	
Marcapiani e cornicioni								
Copertura							●	●

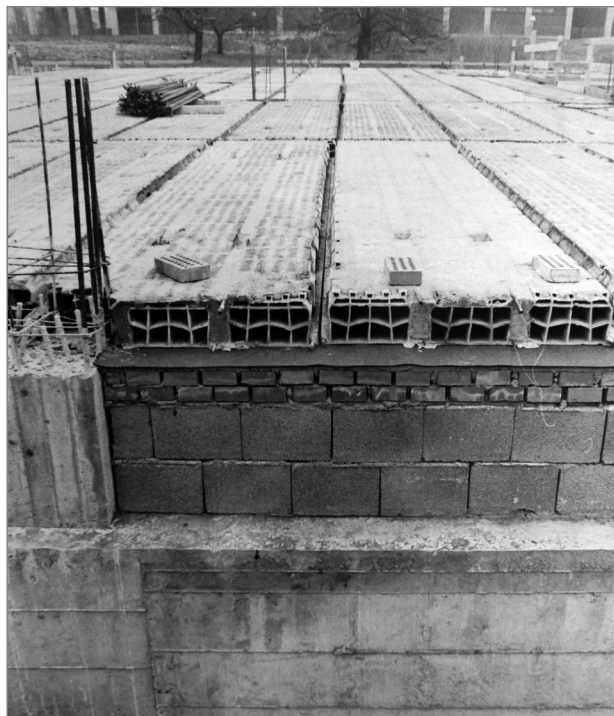
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



Pianta piano terra



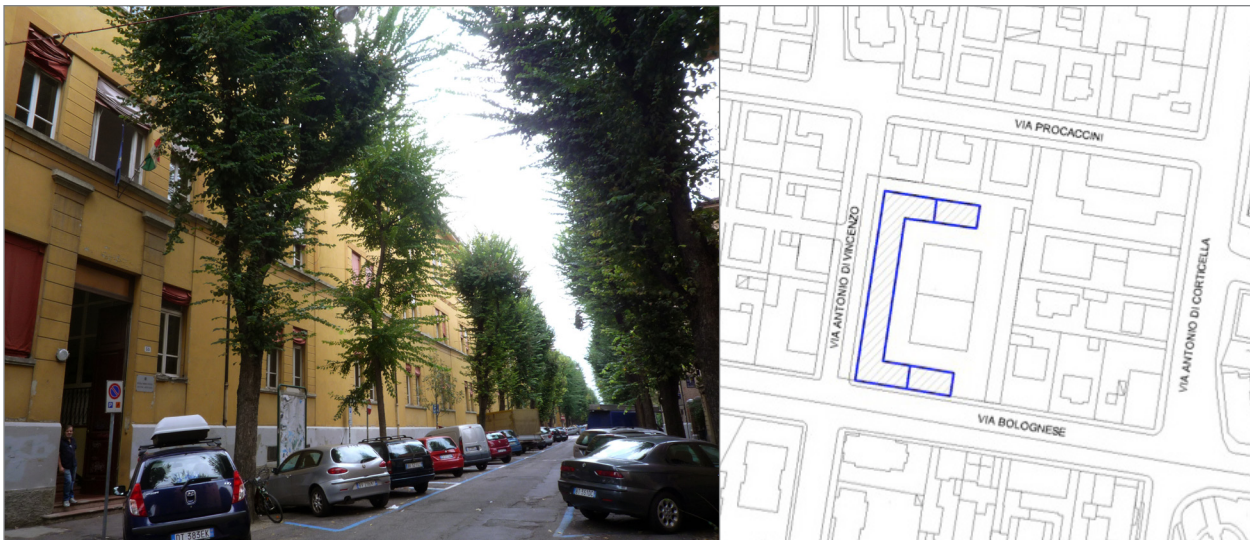
Pianta piano primo



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (OTTOBRE 2012)



2. SCUOLE “TESTONI-FIORAVANTI”



DATI GENERALI	
Nome	“Testoni-Fioravanti” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.5
Quartiere	Navile
Indirizzo	via A. Di Vincenzo, 55
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1930 circa
Progettisti	np
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	1950 - Ripristino danni di guerra 2010 - Recupero strutturale per miglioramento sismico
Modello distributivo	Corridoio laterale
Tipo edilizio	A blocco accorpato

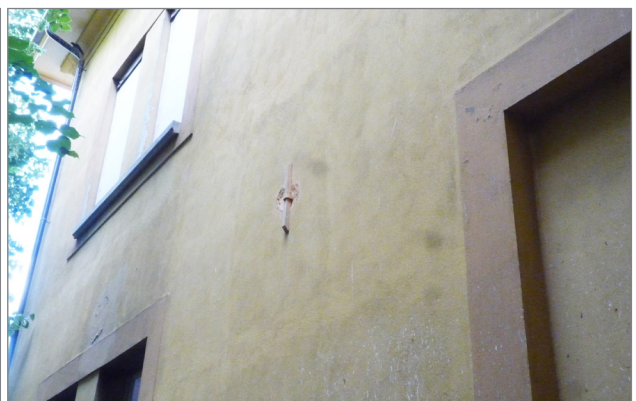
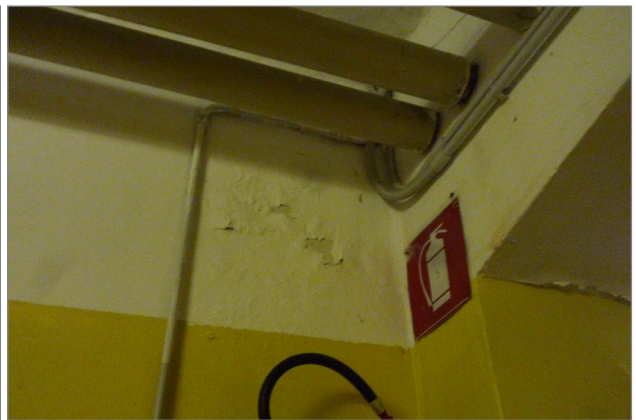
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	3.659
Altezza piano [m]	3,10 - 4,55 - 4,55 - 4,50
Volume netto riscaldato [m ³]	15.429
Volume lordo riscaldato [m ³]	18.633
Livelli	4
Rapporto di forma S/V	0,36
Rapporto di finestratura	Medio-Alto

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Muratura portante		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Muratura portante	Muri portanti	Intonaco 2 cm Mattone 40 cm Intonaco 2 cm
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio	Piastrelle 1 cm Soletta c.a. 20 cm Sottofondo cemento magro 10 cm
	Piano primo	Solaio in laterocemento	Piastrelle 1 cm Sottofondo cemento magro 10 cm Solaio 30 cm
Copertura	Falde	Solaio di copertura	Solaio in laterocemento 25 cm Coppi
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / in legno Vetro semplice / Doppio vetro	Vetro 0,3 cm Infissi 5 cm


STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●		●		●		●	
Tamponamenti esterni					●		●	●
Marcapiani e cornicioni					●			
Copertura								


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (SETTEMBRE 2012)



3. SCUOLE “PANZINI”



DATI GENERALI	
Nome	“Villa Torchi” (scuole primarie) - “Panzini” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.4
Quartiere	Navile
Indirizzo	via G. Verne, 19
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1975
Progettisti	Gruppo Arch. Salomoni
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	Corridoio laterale
Tipo edilizio	Scuola estesa

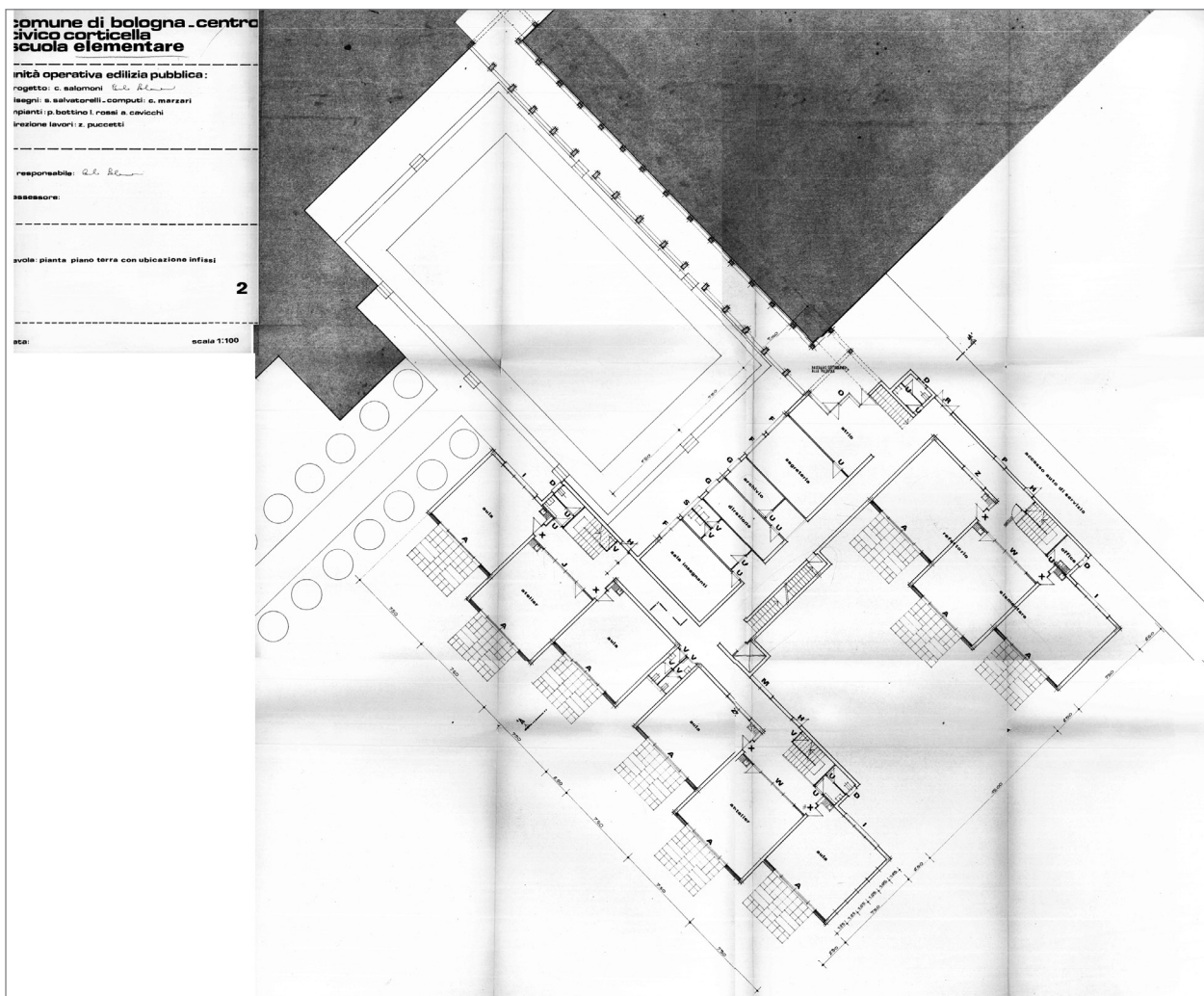
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	3.978
Altezza piano [m]	3,75
Volume netto riscaldato [m ³]	11.847
Volume lordo riscaldato [m ³]	13.325
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,32
Rapporto di finestratura	Medio-Alto

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Mista: telaio in c.a., pareti portanti e tamponamenti in muratura		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a. in opera Muratura portante	Travi e pilastri in c.a. in opera Muri portanti	C.a. Mattoni
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento	Solaio con travetti a traliccio e pignatte 24 cm Soletta collaborante in c.a. 4 cm
	Piano primo	Solaio in laterocemento	Solaio con travetti a traliccio e pignatte 24 cm Soletta collaborante in c.a. 4 cm
Copertura	Inclinata	Solaio in laterocemento	Solaio con travetti a traliccio e pignatte 24 cm Pavimentazione
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Mattone
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●			●				●
Pilastrature d'angolo				●				
Tamponamenti esterni	●				●		●	●
Marcapiani e cornicioni								●
Copertura				●				●

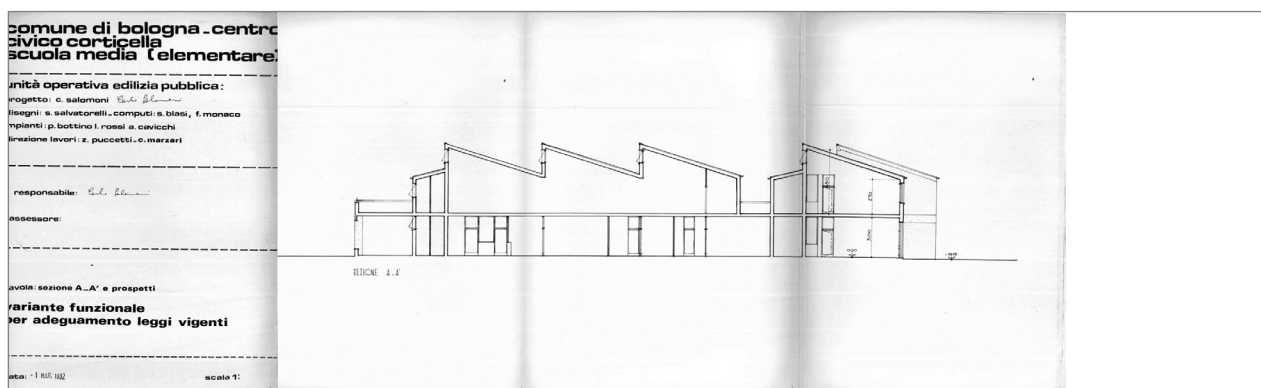
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



Pianta piano terra



Pianta piano primo



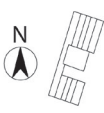
Sezione


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (SETTEMBRE 2012)



4. SCUOLE “ZAPPA”



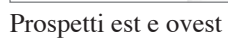
DATI GENERALI	
Nome	“Casaralta” (scuole primarie) - “Zappa” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.15
Quartiere	Navile
Indirizzo	via Saliceto, 74
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1978-1981
Progettisti	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Gualdi, Ing. Repetto, Geom. Masi, Ing. Bottino)
Impresa costruttrice	Fratelli Faggioli, Tecnosacca Prefabbricati S.p.A.
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	Unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra

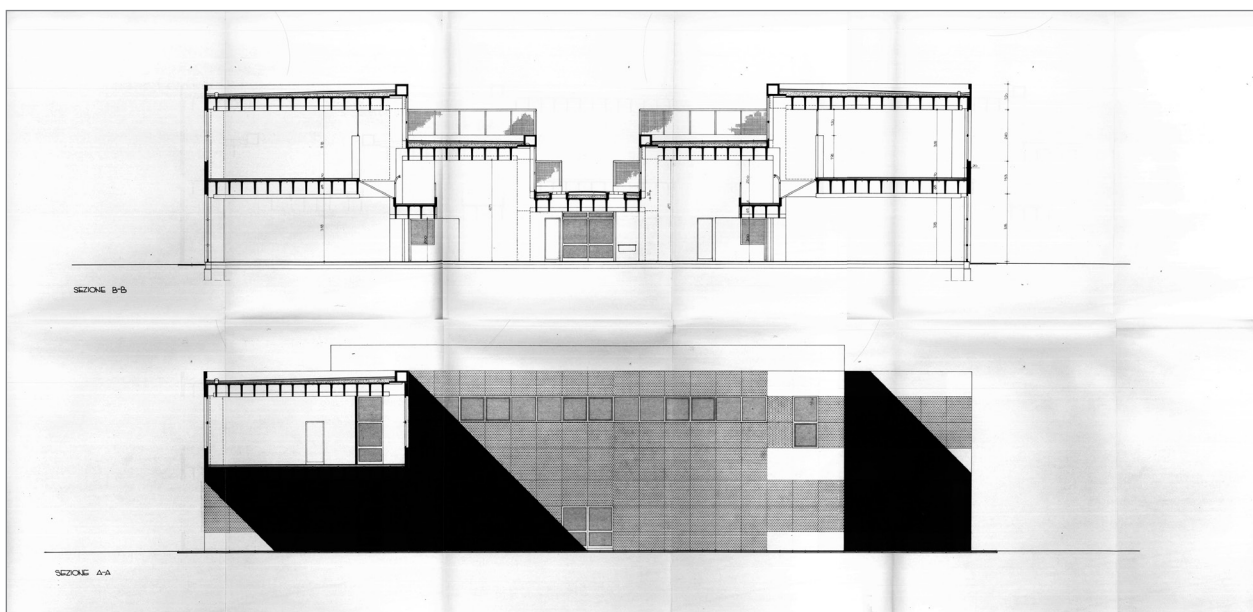
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	6.477
Altezza piano [m]	3,35
Volume netto riscaldato [m ³]	17.790
Volume lordo riscaldato [m ³]	22.238
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,42
Rapporto di finestratura	Alto

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio	Piastrelle 1 cm Sottofondo cls 8 cm Soletta c.a. 20 cm Massetto 10 cm
	Piano primo	Tegolo prefabbricato	C.a.
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	Tegolo c.a. Pannello isolante Guaina
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio di polistirolo	Strato in cls 8 cm Polistirolo 5 cm Strato in cls 7 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro / Doppio vetro con camera	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm Intercapedine 1 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale			●	●		●		
Pilastrature d'angolo	●		●					
Tamponamenti esterni	●	●	●				●	●
Marcapiani e cornicioni								
Copertura			●					●

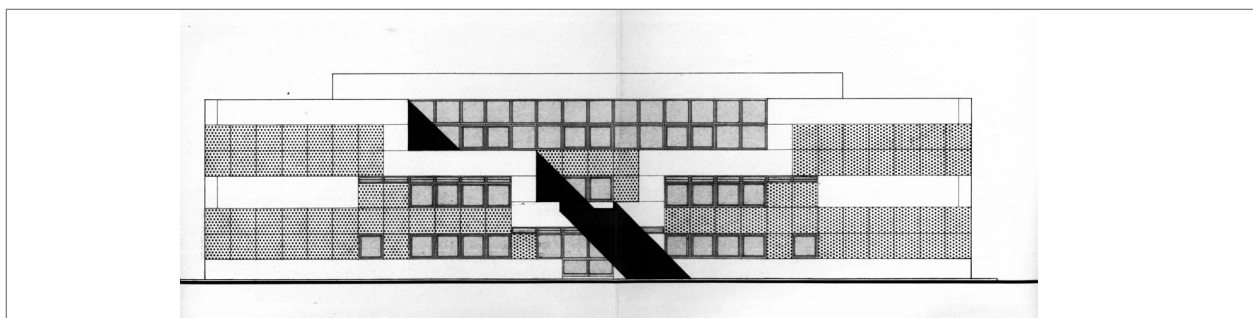




Sezioni trasversali A-A e B-B



Sezioni trasversali C-C e D-D



Prospetto sud

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



5. SCUOLE “SALVO D’ACQUISTO”



DATI GENERALI	
Nome	“Salvo D’Acquisto” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.3
Quartiere	Porto
Indirizzo	via della Beverara, 188
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1985
Progettisti	Gruppi di Lavoro del Comune (Arch. Merlo, Geom. Masi, Geom. Rauli)
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni (Forlì), EPC Emiliana Prefabbricati Coop (Campogalliano)
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	2012 Intervento di consolidamento strutturale
Modello distributivo	Corridoio laterale
Tipo edilizio	A piastra con corte interna

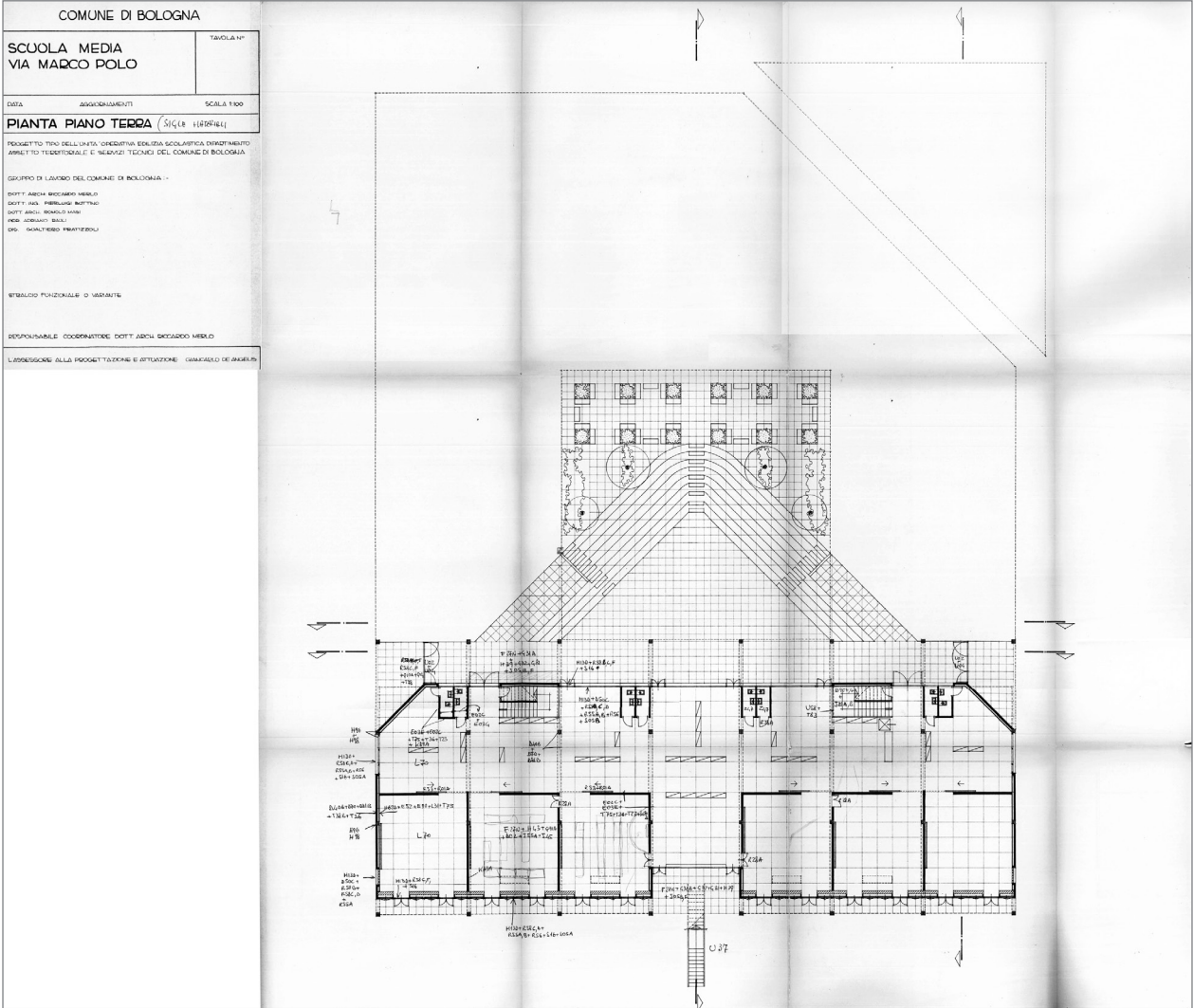
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	2.540
Altezza piano [m]	8
Volume netto riscaldato [m ³]	16.248
Volume lordo riscaldato [m ³]	17.775
Livelli	2 - 3
Rapporto di forma S/V	0,53
Rapporto di finestratura	Alto

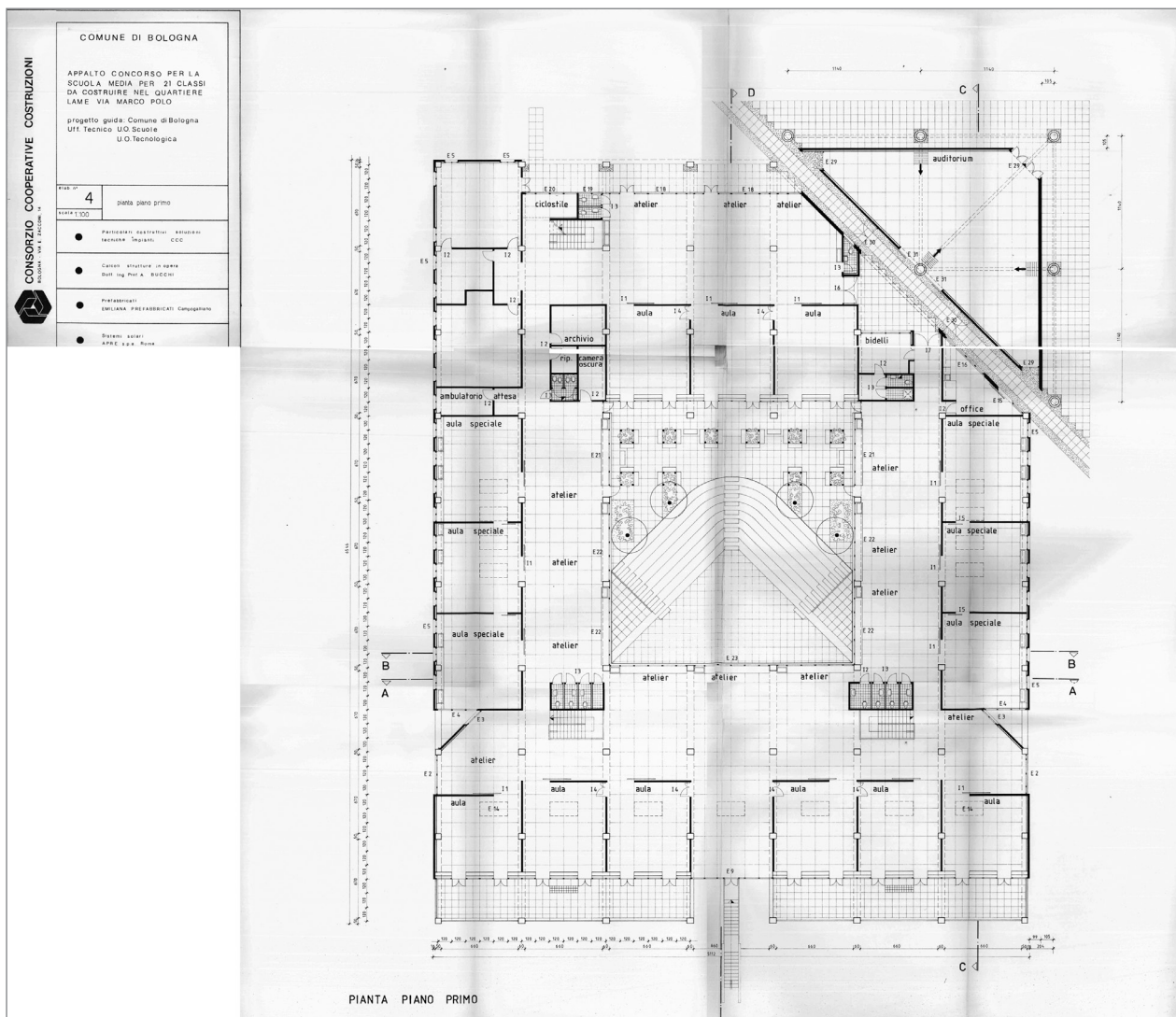
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastri e travi prefabbricati	C.a. prefabbricato
Orizzontamenti	Piano terra	Tegolo prefabbricato	Tegolo c.a.
	Piano primo	Tegolo prefabbricato	Tegolo c.a.
	Piano secondo	Tegolo prefabbricato	Tegolo c.a.
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato	Tegolo c.a.
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello in cls con argilla espansa	Pannello in cls 35 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro con camera	Vetro 0,4 cm Infissi 3 cm Intercapedine 1,2 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●		●	●		●		
Pilastrature d'angolo	●		●					
Tamponamenti esterni	●		●				●	
Marcapiani e cornicioni					●			
Copertura			●					●

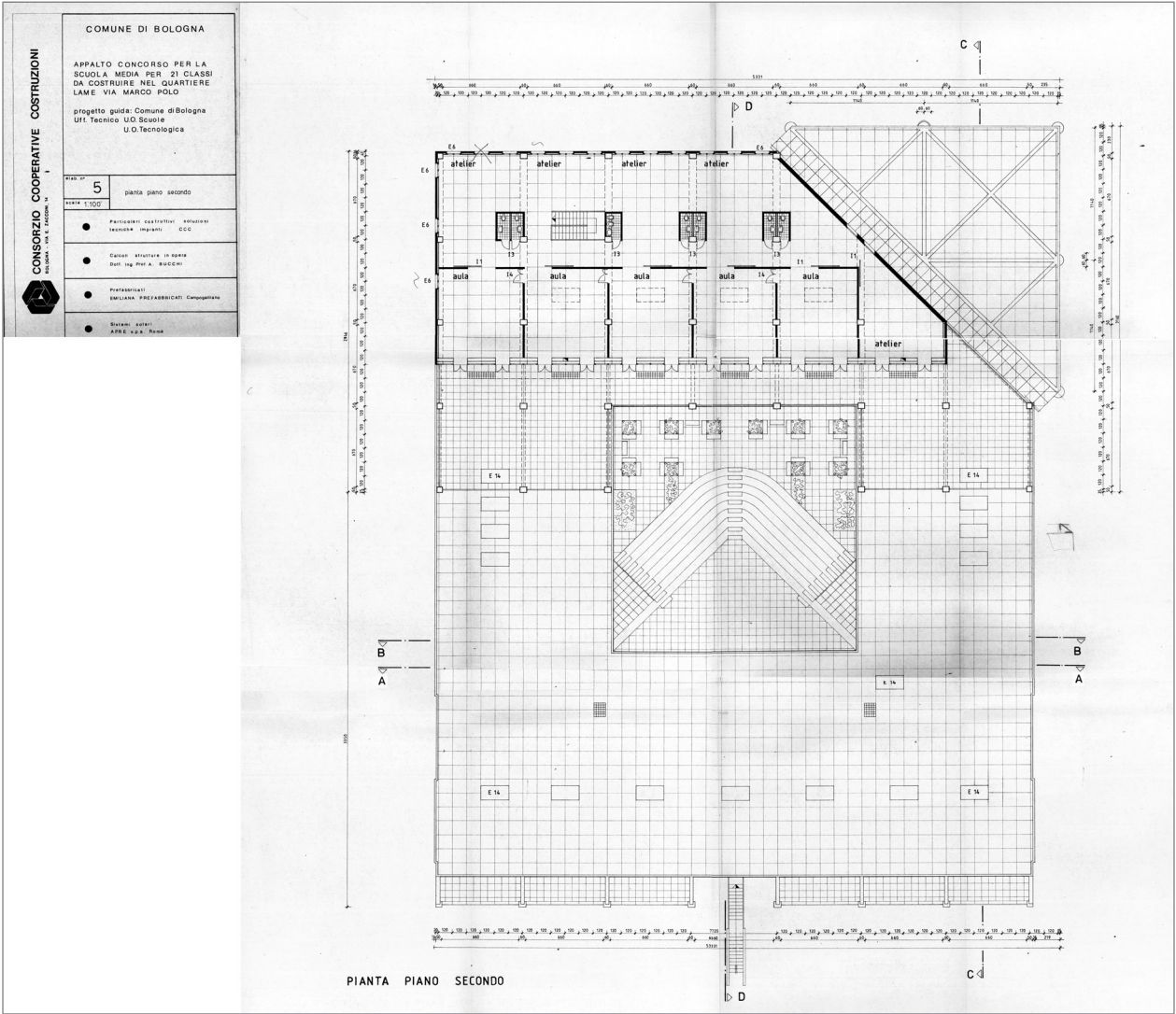
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



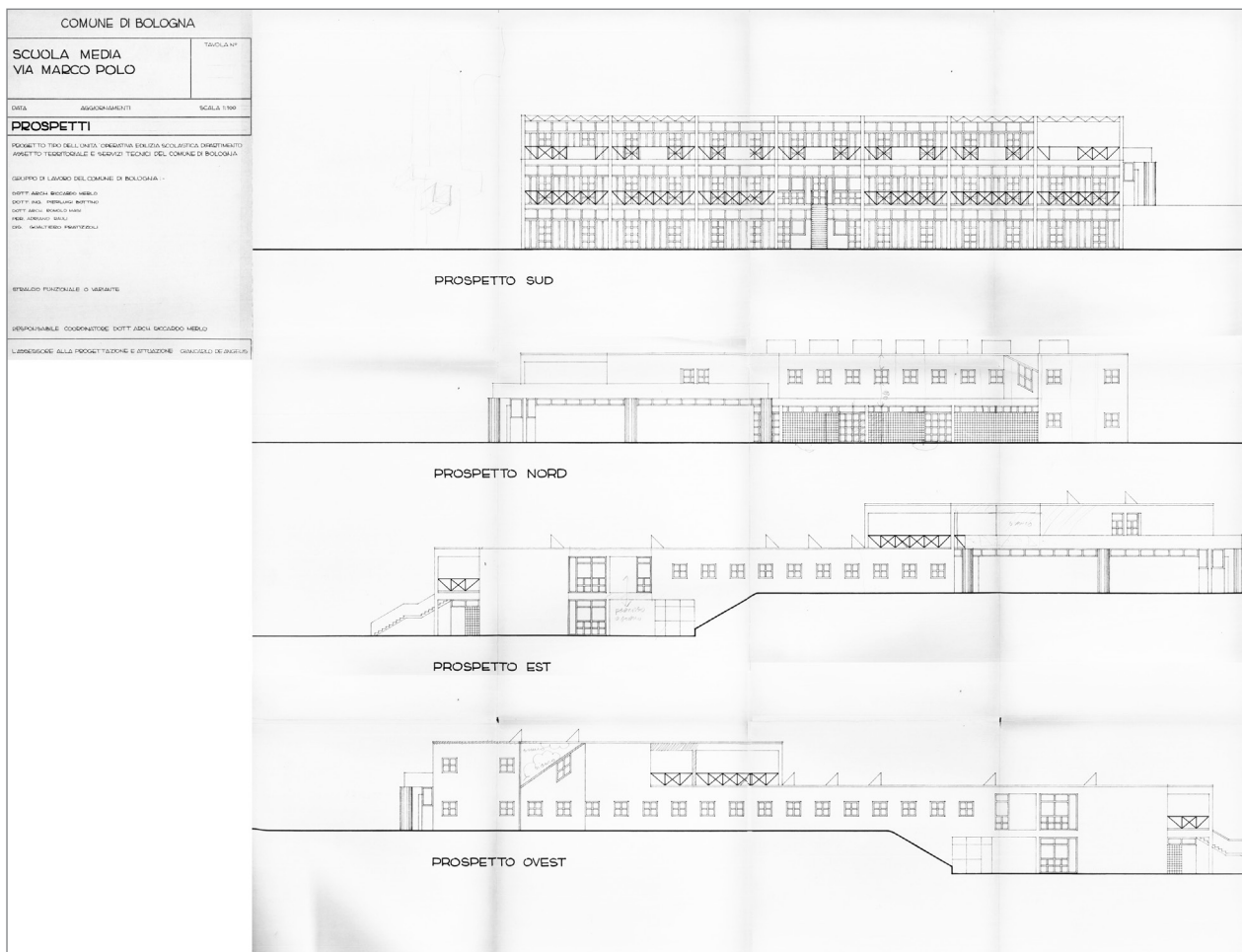
Pianta piano terra



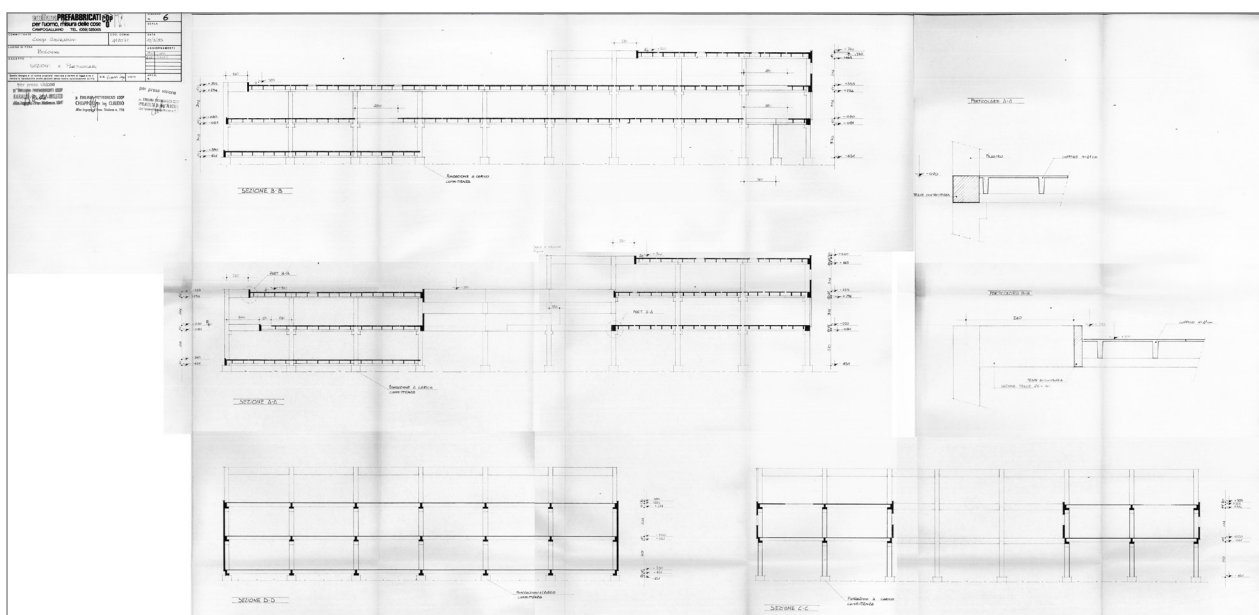
Pianta piano primo



Pianta piano secondo



Prospetti

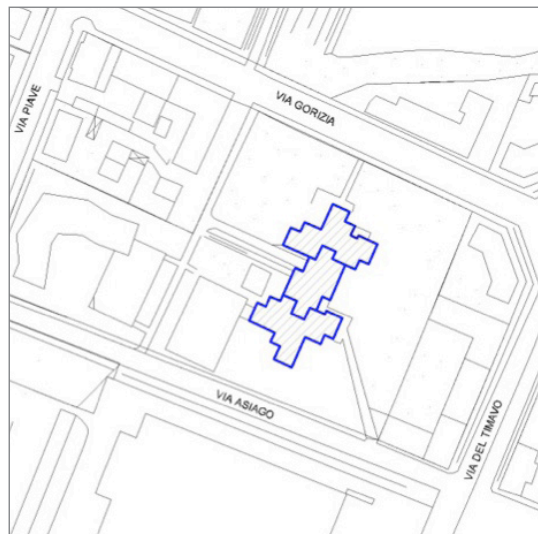



Sezioni

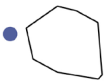
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



6. SCUOLE “DE ANDRÈ - EX ALIGHIERI”



DATI GENERALI	
Nome	“Monterumici” (scuole primarie) - “De Andrè - Ex Alighieri” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.18
Quartiere	Porto
Indirizzo	via Asiago, 33
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1970-1972
Progettisti	Arch. Fagnoni, Arch. Felli, Arch. Guarnacci
Impresa costruttrice	Fratelli Faggioli
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	Unità funzionali
Tipo edilizio	Scuola estesa

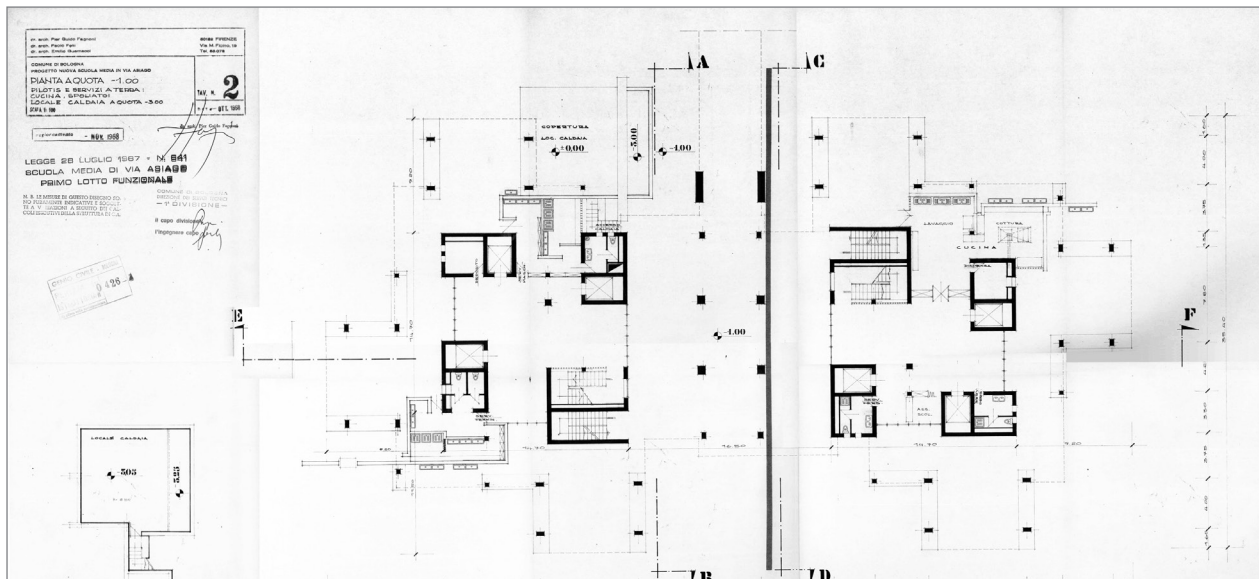
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	5.410
Altezza piano [m]	3
Volume netto riscaldato [m ³]	26.653
Volume lordo riscaldato [m ³]	29.744
Livelli	6
Rapporto di forma S/V	0,34
Rapporto di finestratura	Medio

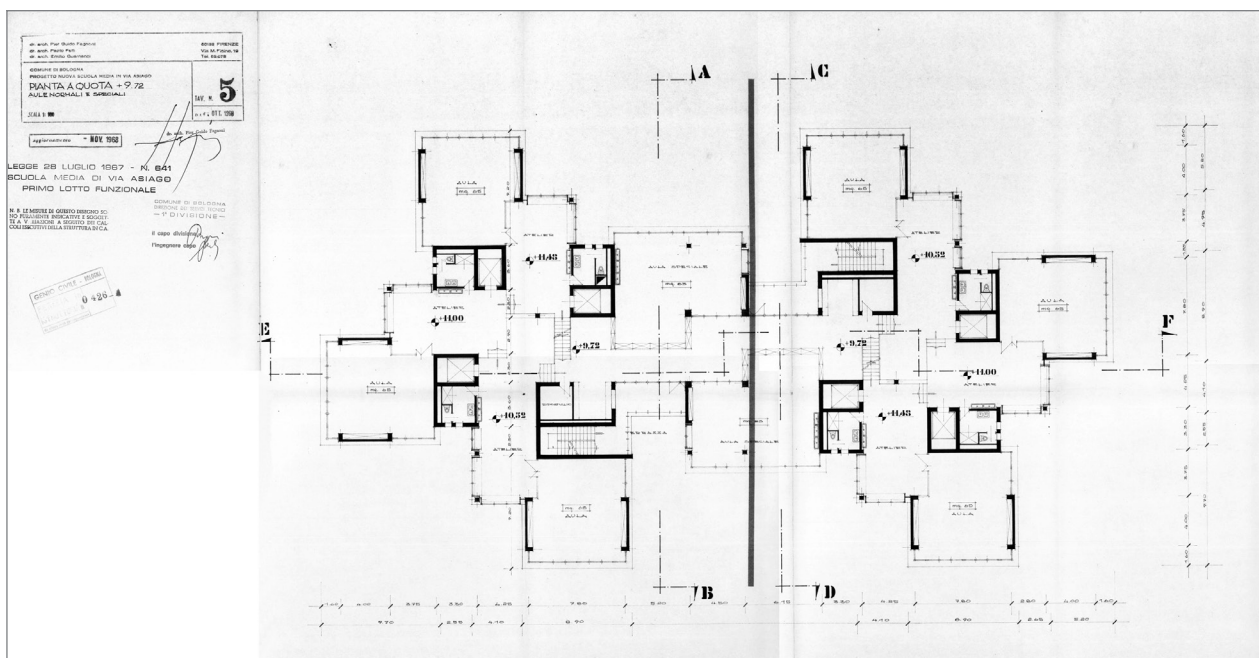
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato in opera		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi in opera	C.a.
Orizzontamenti	Piano tipo	Solaio in laterocemento	Piastrelle 1 cm Sottofondo cls 4 cm Solaio in laterocemento (volter- ranee e armatura parallela) 20 cm
Copertura	Piana	Solaio di copertura in laterocemento	Controsoffitto Solaio in laterocemento Tavole e camera d'aria Massetto in cls di pomice Guaina Ghiaia
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Muratura	Intonaco interno Mattoni pieni Intonaco plastico granigliato
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro con camera	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●							
Pilastrature d'angolo	●							
Tamponamenti esterni	●						●	●
Copertura								●

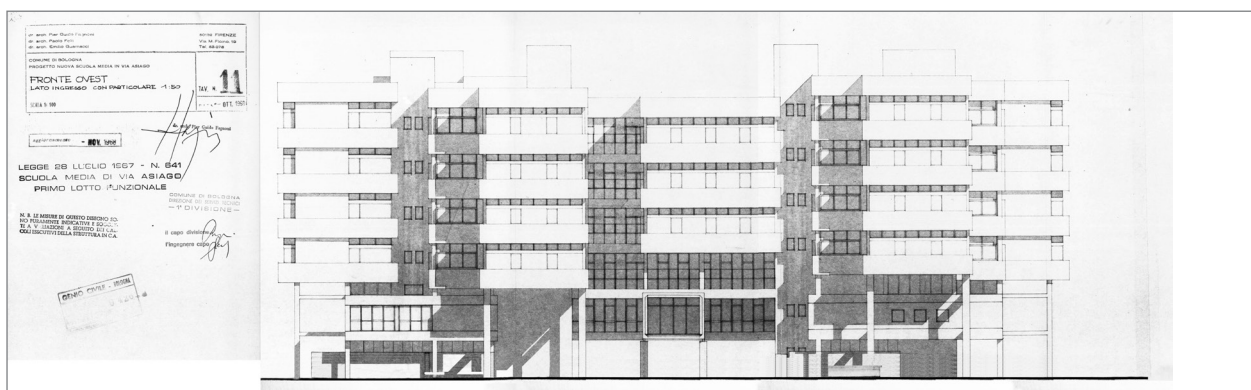
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



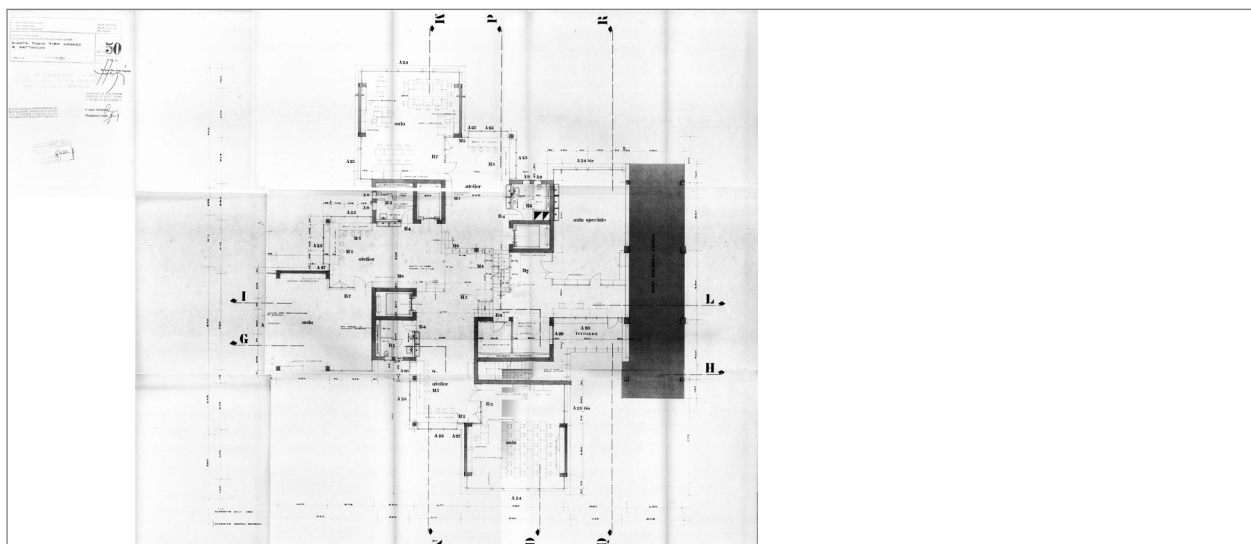
Pianta seminterrato (quota - 1,00 m)



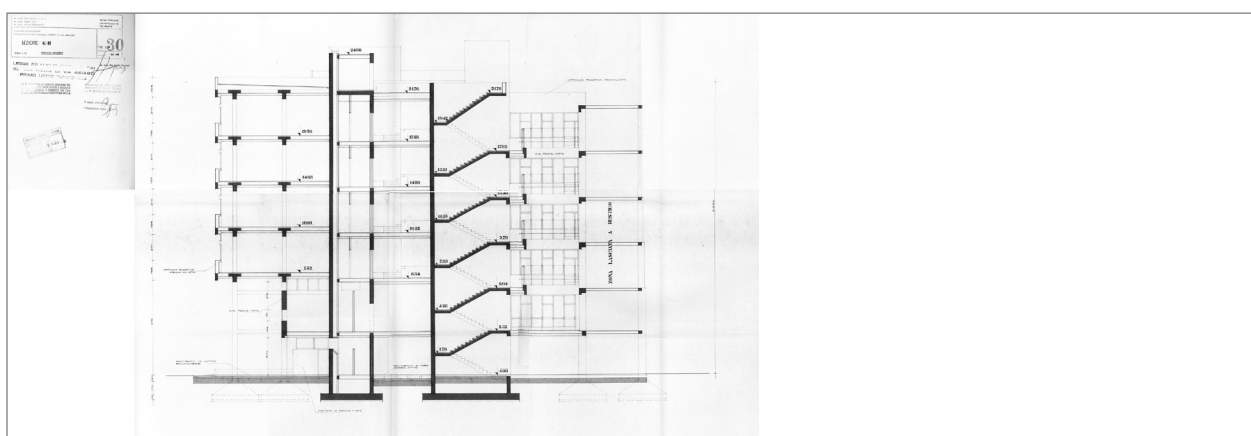
Pianta piano tipo (quota + 9,72 m)



Prospetto fronte ovest

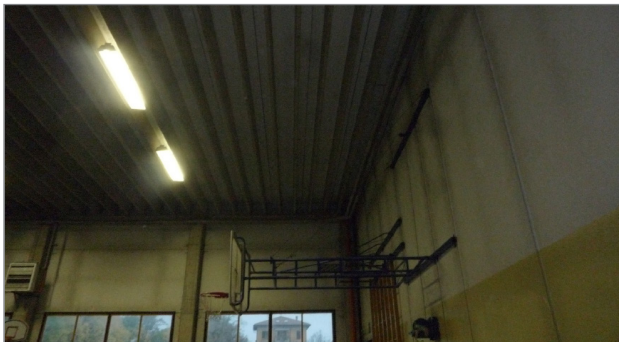


Pianta piano tipo, con arredi (riferimento per sezioni)




Sezione G-H


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



7. SCUOLE “GANDINO”



DATI GENERALI	
Nome	“Guidi” (scuole primarie) - “Gandino” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.17
Quartiere	Porto
Indirizzo	via Graziano, 8
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1955-1958
Progettisti	Arch. Vaccaro
Impresa costruttrice	Gambarino - Sciaccalunga
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	Corridoio (laterale o centrale)
Tipo edilizio	A blocco accorpato

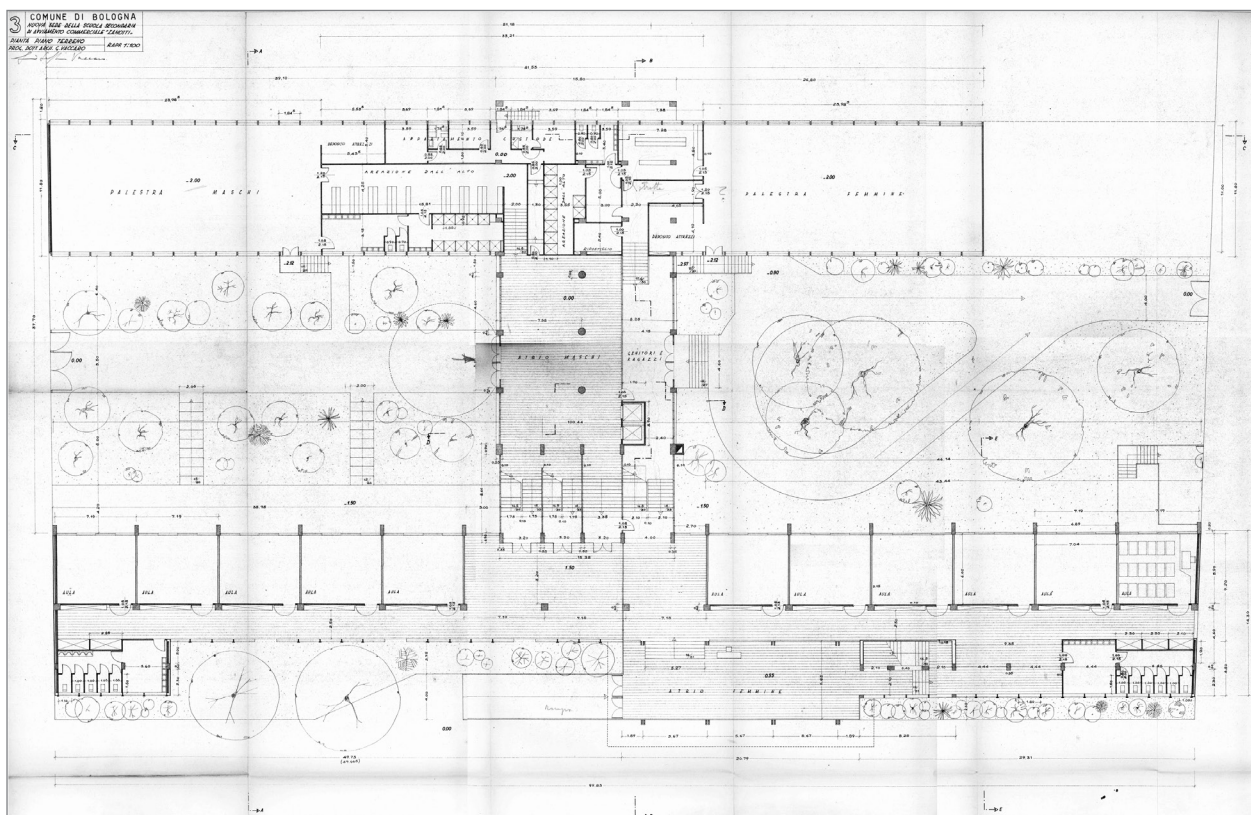
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	8.315
Altezza piano [m]	3,1
Volume netto riscaldato [m ³]	121.248
Volume lordo riscaldato [m ³]	124.725
Livelli	5
Rapporto di forma S/V	0,42
Rapporto di finestratura	Medio-Alto

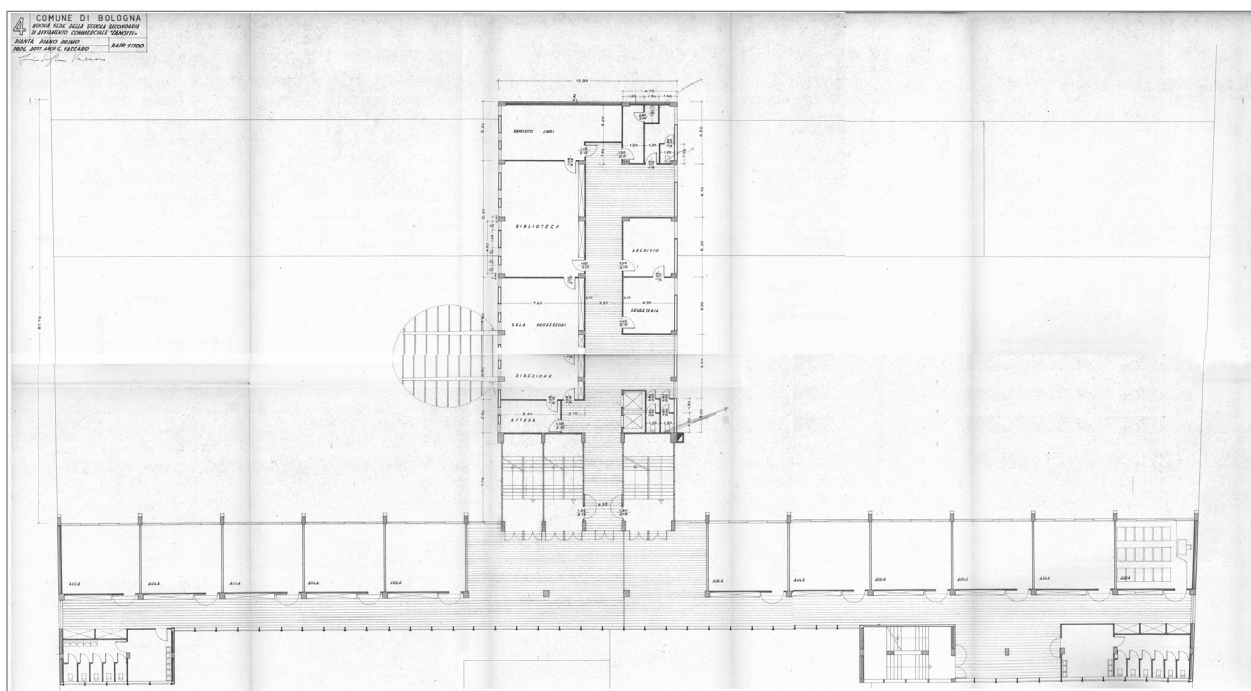
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato in opera		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi in opera	C.a.
Orizzontamenti	Piano tipo	Solaio in laterocemento	Soletta in cls 4 cm Monoblocchi in laterizio 21 cm Piastrine 1 cm Sottofondo cls 4 cm
Copertura	Piana	Solaio di copertura	np
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro / Doppio vetro con camera	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm Intercapedine 1,2 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●			●				
Pilastrature d'angolo	●							
Tamponamenti esterni	●						●	●
Marcapiani e cornicioni				●				
Copertura								●

DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



Pianta piano terra (riferimento per sezioni)

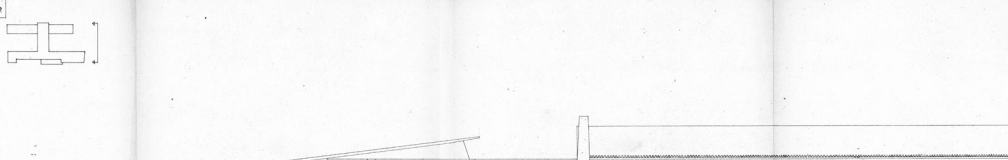


Pianta piano primo

7 COMUNE DI BOLOGNA
NUOVA SEDE DELLA SCUOLA SECONDARIA
D'ATTENDIMENTO COMMERCIALE "CAROTTI".

PROGETTO: OMBRE
PROGETTO: ANGELO VECCHIARI
RAPP. TIPOLOGICO

Angelo Vecchiari



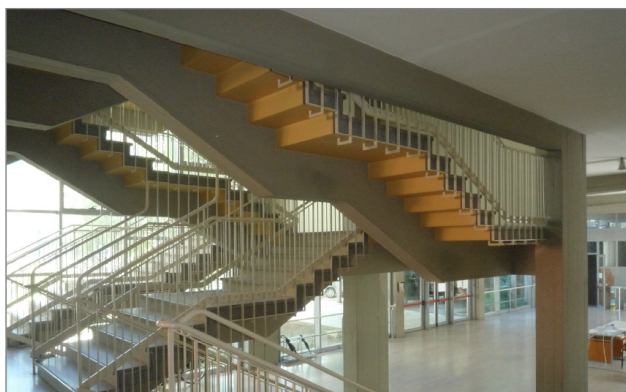
COMUNE DI BOLOGNA
 NUOVA SEDE ALLA SCUOLA TECNICA
 MAPPA DI RIFERIMENTO CATASTRALE SANIETTI
 PROGETTO EST
 1950 - 1951 - 1952 - 1953 - 1954 - 1955 - 1956 - 1957 - 1958 - 1959 - 1960 - 1961 - 1962 - 1963 - 1964 - 1965 - 1966 - 1967 - 1968 - 1969 - 1970 - 1971 - 1972 - 1973 - 1974 - 1975 - 1976 - 1977 - 1978 - 1979 - 1980 - 1981 - 1982 - 1983 - 1984 - 1985 - 1986 - 1987 - 1988 - 1989 - 1990 - 1991 - 1992 - 1993 - 1994 - 1995 - 1996 - 1997 - 1998 - 1999 - 2000 - 2001 - 2002 - 2003 - 2004 - 2005 - 2006 - 2007 - 2008 - 2009 - 2010 - 2011 - 2012 - 2013 - 2014 - 2015 - 2016 - 2017 - 2018 - 2019 - 2020 - 2021 - 2022 - 2023 - 2024 - 2025 - 2026 - 2027 - 2028 - 2029 - 2030 - 2031 - 2032 - 2033 - 2034 - 2035 - 2036 - 2037 - 2038 - 2039 - 2040 - 2041 - 2042 - 2043 - 2044 - 2045 - 2046 - 2047 - 2048 - 2049 - 2050 - 2051 - 2052 - 2053 - 2054 - 2055 - 2056 - 2057 - 2058 - 2059 - 2060 - 2061 - 2062 - 2063 - 2064 - 2065 - 2066 - 2067 - 2068 - 2069 - 2070 - 2071 - 2072 - 2073 - 2074 - 2075 - 2076 - 2077 - 2078 - 2079 - 2080 - 2081 - 2082 - 2083 - 2084 - 2085 - 2086 - 2087 - 2088 - 2089 - 2090 - 2091 - 2092 - 2093 - 2094 - 2095 - 2096 - 2097 - 2098 - 2099 - 2100 - 2101 - 2102 - 2103 - 2104 - 2105 - 2106 - 2107 - 2108 - 2109 - 2110 - 2111 - 2112 - 2113 - 2114 - 2115 - 2116 - 2117 - 2118 - 2119 - 2120 - 2121 - 2122 - 2123 - 2124 - 2125 - 2126 - 2127 - 2128 - 2129 - 2130 - 2131 - 2132 - 2133 - 2134 - 2135 - 2136 - 2137 - 2138 - 2139 - 2140 - 2141 - 2142 - 2143 - 2144 - 2145 - 2146 - 2147 - 2148 - 2149 - 2150 - 2151 - 2152 - 2153 - 2154 - 2155 - 2156 - 2157 - 2158 - 2159 - 2160 - 2161 - 2162 - 2163 - 2164 - 2165 - 2166 - 2167 - 2168 - 2169 - 2170 - 2171 - 2172 - 2173 - 2174 - 2175 - 2176 - 2177 - 2178 - 2179 - 2180 - 2181 - 2182 - 2183 - 2184 - 2185 - 2186 - 2187 - 2188 - 2189 - 2190 - 2191 - 2192 - 2193 - 2194 - 2195 - 2196 - 2197 - 2198 - 2199 - 2200 - 2201 - 2202 - 2203 - 2204 - 2205 - 2206 - 2207 - 2208 - 2209 - 2210 - 2211 - 2212 - 2213 - 2214 - 2215 - 2216 - 2217 - 2218 - 2219 - 2220 - 2221 - 2222 - 2223 - 2224 - 2225 - 2226 - 2227 - 2228 - 2229 - 2230 - 2231 - 2232 - 2233 - 2234 - 2235 - 2236 - 2237 - 2238 - 2239 - 2240 - 2241 - 2242 - 2243 - 2244 - 2245 - 2246 - 2247 - 2248 - 2249 - 2250 - 2251 - 2252 - 2253 - 2254 - 2255 - 2256 - 2257 - 2258 - 2259 - 2260 - 2261 - 2262 - 2263 - 2264 - 2265 - 2266 - 2267 - 2268 - 2269 - 2270 - 2271 - 2272 - 2273 - 2274 - 2275 - 2276 - 2277 - 2278 - 2279 - 2280 - 2281 - 2282 - 2283 - 2284 - 2285 - 2286 - 2287 - 2288 - 2289 - 2290 - 2291 - 2292 - 2293 - 2294 - 2295 - 2296 - 2297 - 2298 - 2299 - 2300 - 2301 - 2302 - 2303 - 2304 - 2305 - 2306 - 2307 - 2308 - 2309 - 2310 - 2311 - 2312 - 2313 - 2314 - 2315 - 2316 - 2317 - 2318 - 2319 - 2320 - 2321 - 2322 - 2323 - 2324 - 2325 - 2326 - 2327 - 2328 - 2329 - 2330 - 2331 - 2332 - 2333 - 2334 - 2335 - 2336 - 2337 - 2338 - 2339 - 2340 - 2341 - 2342 - 2343 - 2344 - 2345 - 2346 - 2347 - 2348 - 2349 - 2350 - 2351 - 2352 - 2353 - 2354 - 2355 - 2356 - 2357 - 2358 - 2359 - 2360 - 2361 - 2362 - 2363 - 2364 - 2365 - 2366 - 2367 - 2368 - 2369 - 2370 - 2371 - 2372 - 2373 - 2374 - 2375 - 2376 - 2377 - 2378 - 2379 - 2380 - 2381 - 2382 - 2383 - 2384 - 2385 - 2386 - 2387 - 2388 - 2389 - 2390 - 2391 - 2392 - 2393 - 2394 - 2395 - 2396 - 2397 - 2398 - 2399 - 2400 - 2401 - 2402 - 2403 - 2404 - 2405 - 2406 - 2407 - 2408 - 2409 - 2410 - 2411 - 2412 - 2413 - 2414 - 2415 - 2416 - 2417 - 2418 - 2419 - 2420 - 2421 - 2422 - 2423 - 2424 - 2425 - 2426 - 2427 - 2428 - 2429 - 2430 - 2431 - 2432 - 2433 - 2434 - 2435 - 2436 - 2437 - 2438 - 2439 - 2440 - 2441 - 2442 - 2443 - 2444 - 2445 - 2446 - 2447 - 2448 - 2449 - 2450 - 2451 - 2452 - 2453 - 2454 - 2455 - 2456 - 2457 - 2458 - 2459 - 2460 - 2461 - 2462 - 2463 - 2464 - 2465 - 2466 - 2467 - 2468 - 2469 - 2470 - 2471 - 2472 - 2473 - 2474 - 2475 - 2476 - 2477 - 2478 - 2479 - 2480 - 2481 - 2482 - 2483 - 2484 - 2485 - 2486 - 2487 - 2488 - 2489 - 2490 - 2491 - 2492 - 2493 - 2494 - 2495 - 2496 - 2497 - 2498 - 2499 - 2500 - 2501 - 2502 - 2503 - 2504 - 2505 - 2506 - 2507 - 2508 - 2509 - 2510 - 2511 - 2512 - 2513 - 2514 - 2515 - 2516 - 2517 - 2518 - 2519 - 2520 - 2521 - 2522 - 2523 - 2524 - 2525 - 2526 - 2527 - 2528 - 2529 - 2530 - 2531 - 2532 - 2533 - 2534 - 2535 - 2536 - 2537 - 2538 - 2539 - 2540 - 2541 - 2542 - 2543 - 2544 - 2545 - 2546 - 2547 - 2548 - 2549 - 2550 - 2551 - 2552 - 2553 - 2554 - 2555 - 2556 - 2557 - 2558 - 2559 - 2560 - 2561 - 2562 - 2563 - 2564 - 2565 - 2566 - 2567 - 2568 - 2569 - 2570 - 2571 - 2572 - 2573 - 2574 - 2575 - 2576 - 2577 - 2578 - 2579 - 2580 - 2581 - 2582 - 2583 - 2584 - 2585 - 2586 - 2587 - 2588 - 2589 - 2590 - 2591 - 2592 - 2593 - 2594 - 2595 - 2596 - 2597 - 2598 - 2599 - 2600 - 2601 - 2602 - 2603 - 2604 - 2605 - 2606 - 2607 - 2608 - 2609 - 2610 - 2611 - 2612 - 2613 - 2614 - 2615 - 2616 - 2617 - 2618 - 2619 - 2620 - 2621 - 2622 - 2623 -

11 COMUNE DI BOLOGNA
NOTIZI SULLA REGOLA OTTOMANA
LA DIVISIONE DI UN'EDIFICAZIONE OTTOMANA
SEZIONE 1-1
PUNTO DI VISTA E REGOLA OTTOMANA
PUNTO DI VISTA E REGOLA OTTOMANA

SEZIONE 2-2
PUNTO DI VISTA E REGOLA OTTOMANA
PUNTO DI VISTA E REGOLA OTTOMANA

499

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



8. SCUOLE “DOZZA”



DATI GENERALI	
Nome	“Dozza” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.1
Quartiere	Reno
Indirizzo	via A. De Carolis, 23
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1976-1978
Progettisti	Arch. Gualdi, Ing. Finzi, Geom. Gallieri, Goem. Magagni, Ing. Bottino
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni - Coop. Edilter
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	2012 - Ripristino connessione nodi mediante piastre metalliche
Modello distributivo	Unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra

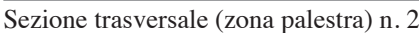
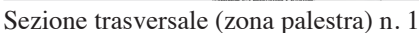
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

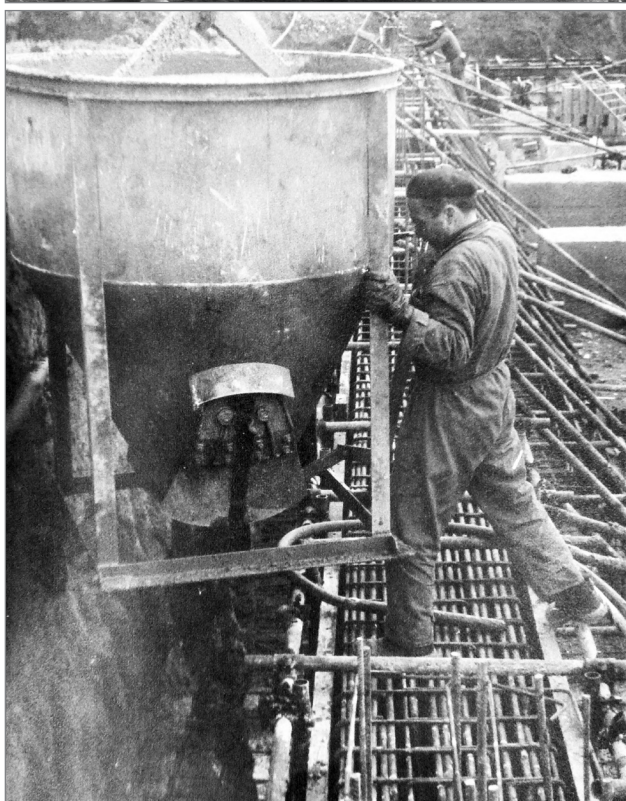
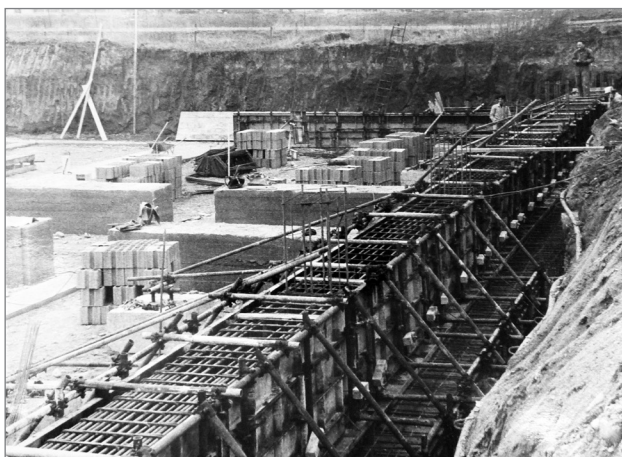
CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	7.000
Altezza piano [m]	3,75
Volume netto riscaldato [m ³]	22.920
Volume lordo riscaldato [m ³]	26.514
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,38
Rapporto di finestratura	Alto

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento	Piastrelle 1 cm Sottofondo cls 8 cm Soletta laterocemento 16 cm Massetto cemento magro 10 cm
	Piano primo	Tegolo prefabbricato	C.a.
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	C.a. prefabbricato Fibra di legno Guaina
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio di polistirolo	Strato in cls 9 cm Polistirolo 3 cm Strato in cls 9 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm

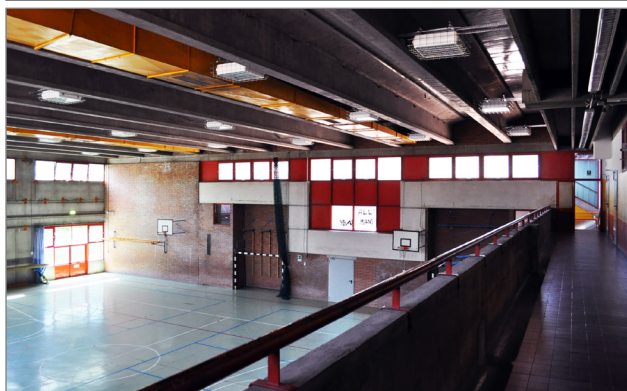
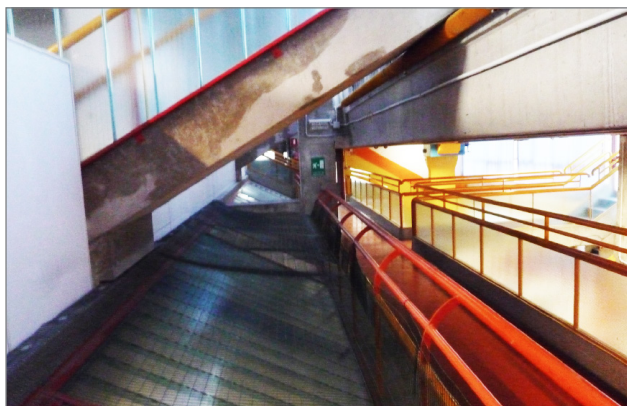
STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●		●	●				
Pilastrature d'angolo	●							
Tamponamenti esterni	●						●	
Marcapiani e cornicioni							●	●
Copertura							●	●









DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (GIUGNO 2012)



9. SCUOLE “ZANOTTI”



DATI GENERALI	
Nome	“De Vigri” (scuole primarie) - “Zanotti” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.12
Quartiere	Reno
Indirizzo	via del Giacinto, 39
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1979
Progettisti	Arch. Gualdi, Ing. Bottino, Geom. Rivalta, Geom. Masi
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	Unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra

PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	4.670
Altezza piano [m]	4
Volume netto riscaldato [m ³]	16.270
Volume lordo riscaldato [m ³]	18.995
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,42
Rapporto di finestratura	Alto

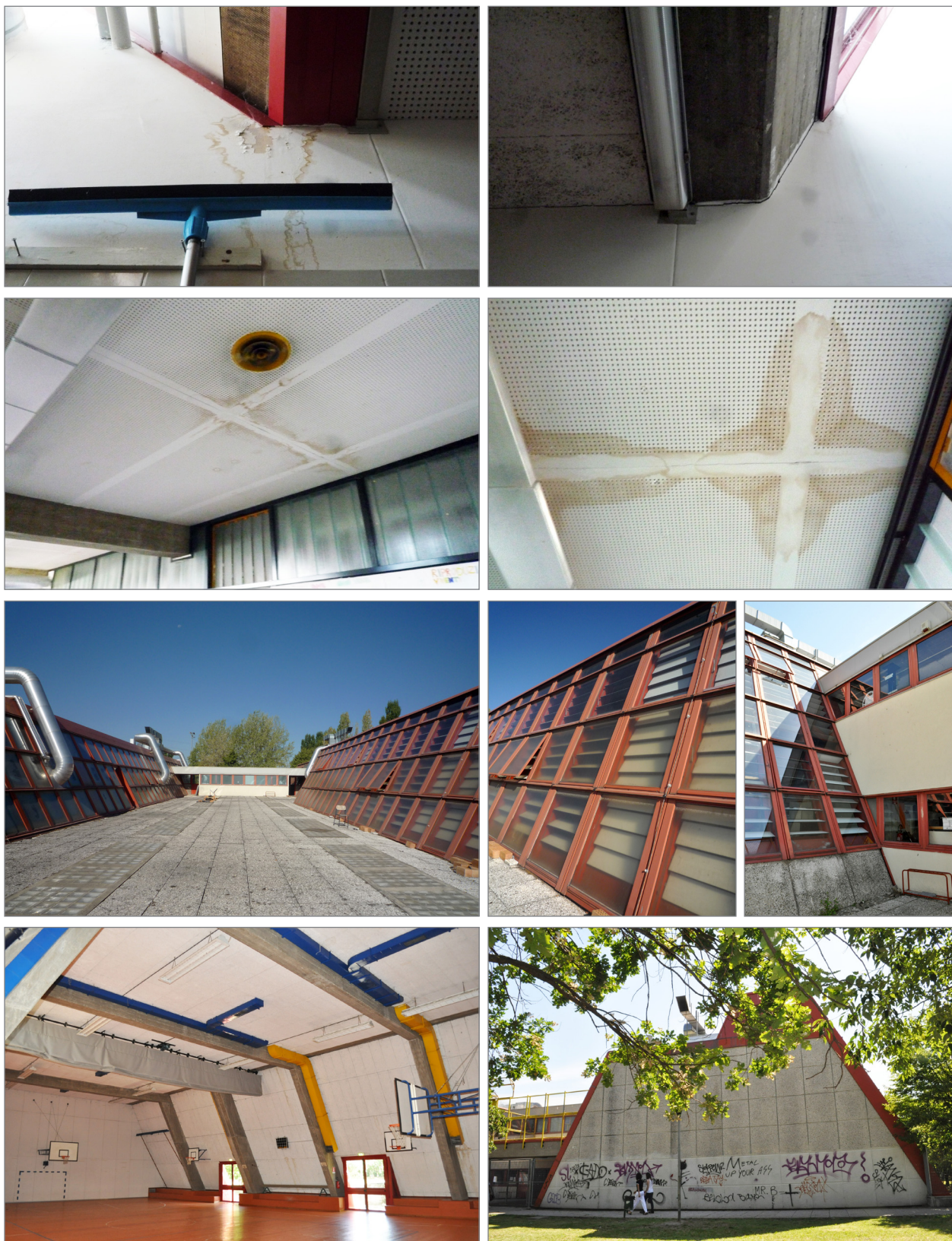
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale		Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato	
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento	Piastrelle 1 cm Soletta in c.a. 8 cm Solaio in laterocemento 21 cm
	Piano primo	Solaio in laterocemento	Piastrelle 1 cm Soletta in c.a. 8 cm Solaio in laterocemento 21 cm
	Piano primo (terrazza)	Solaio prefabbricato	Lastre in pietra 4 cm Copponi in c.a. 24 cm Polistirolo 3 cm Pannelli Celenit 0,5 cm
Copertura	Piana	Coppi prefabbricati	Pannelli in truciolare 0,5 cm Polistirolo 3 cm Copponi in c.a. 24 cm Guaina bituminosa 0,5 cm Ghiaia 2 cm
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls e pietra con strato interno di polistirolo	Pannelli Celenit 0,5 cm Polistirolo 3 cm Blocchi in cls 11 cm Rivestimento in pietra 5,5 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●		●	●				
Pilastrature d'angolo	●			●				
Tamponamenti esterni							●	●
Marcapiani e cornicioni			●				●	
Copertura							●	●

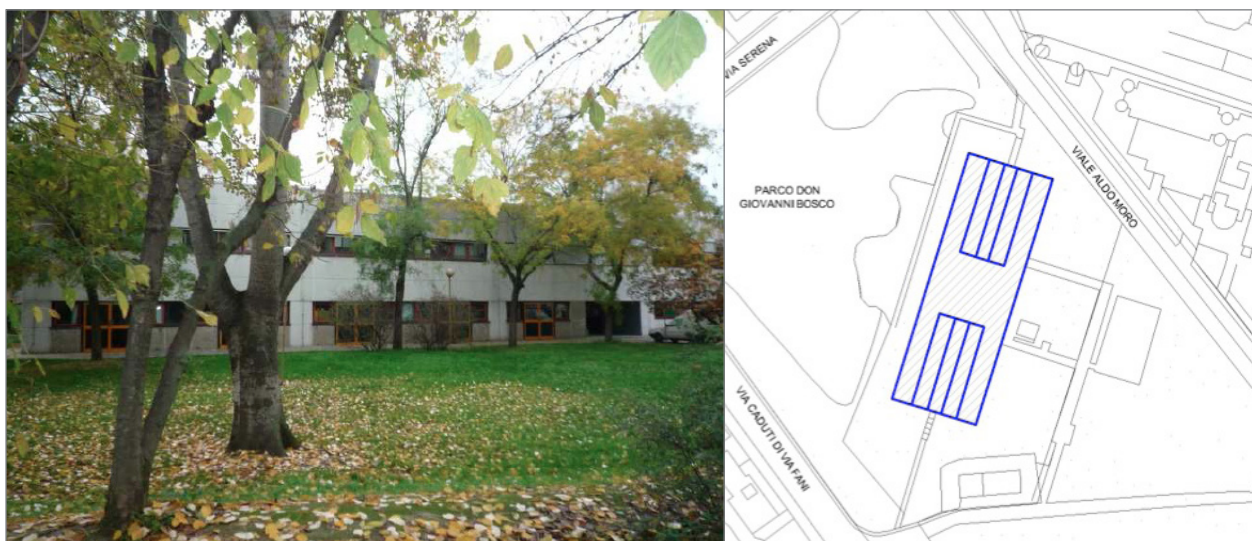






DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (GIUGNO 2012)



10. SCUOLE “BESTA”



DATI GENERALI	
Nome	“Besta” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.10
Quartiere	San Donato
Indirizzo	viale Aldo Moro, 31
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1979-1980
Progettisti	Arch. Gualdi, Ing. Bottino, Geom. Rivalta, Geom. Mignani
Impresa costruttrice	I.C.E.T. - RDB Piacenza (elementi pref.) - Ing. Uberti (getti in opera)
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra

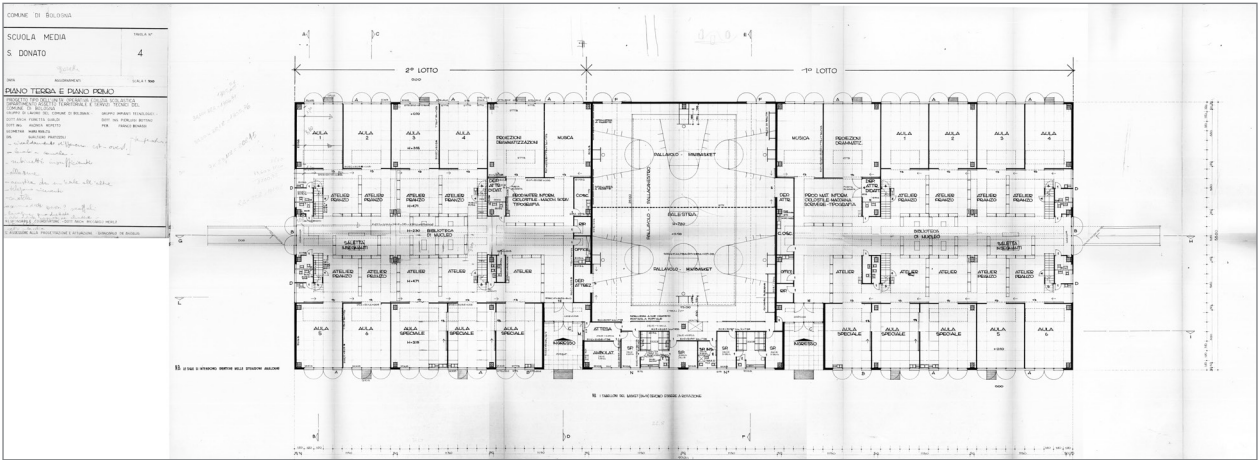
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	5.415
Altezza piano [m]	3,20
Volume netto riscaldato [m ³]	20.535
Volume lordo riscaldato [m ³]	23.258
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,42
Rapporto di finestratura	Alto

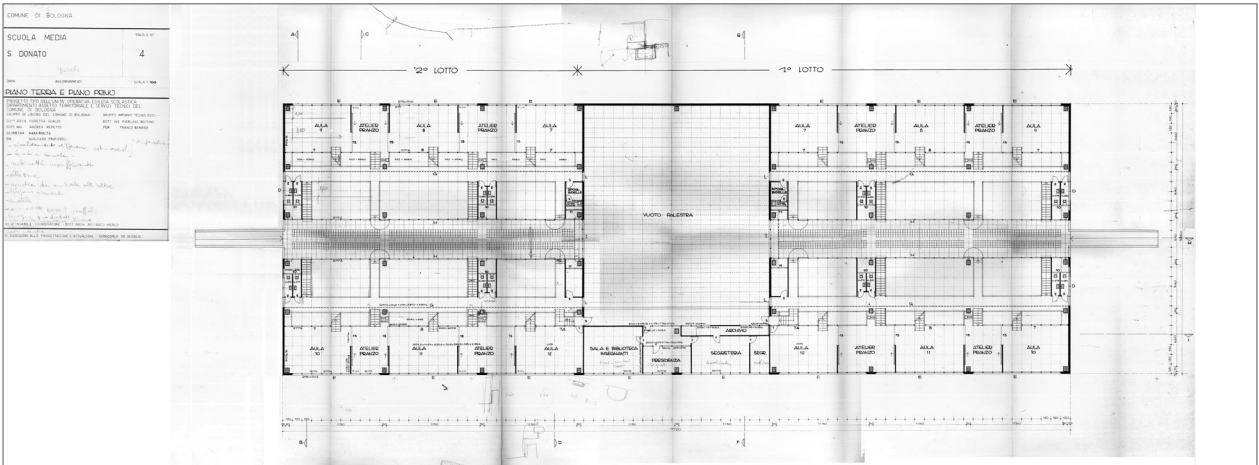
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Mista: telaio in c.a. in opera e tamponamenti in pannelli prefabbricati		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a. in opera	Travi e pilastri in c.a. in opera	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento prefabbricato	Piastrelle 1 cm Sottofondo in cls 8 cm Solaio in laterocemento 16 cm Sottofondo cemento magro 10 cm
	Piano primo	Solaio in laterocemento in opera	Solaio con travetti a traliccio e pignatte 24 cm Pavimentazione
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm) / Porzioni di solaio in c.a. e vetrocemento	Tegolo prefabbricato 30 cm Isolante 1,5 cm Guaina 1 cm Celenit 2 cm / Solaio in c.a. Vetrocemento 8 cm
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato interno di polistirolo	Pannello cls 6 cm Polistirolo 8 cm Pannello cls 6 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Vetro semplice / Doppio vetro / Doppio vetro con camera	Vetro 0,5 cm Infissi 7 cm Intercapedine 1 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●			●				
Pilastrature d'angolo				●				
Tamponamenti esterni	●						●	●
Marcapiani e cornicioni								
Copertura								●

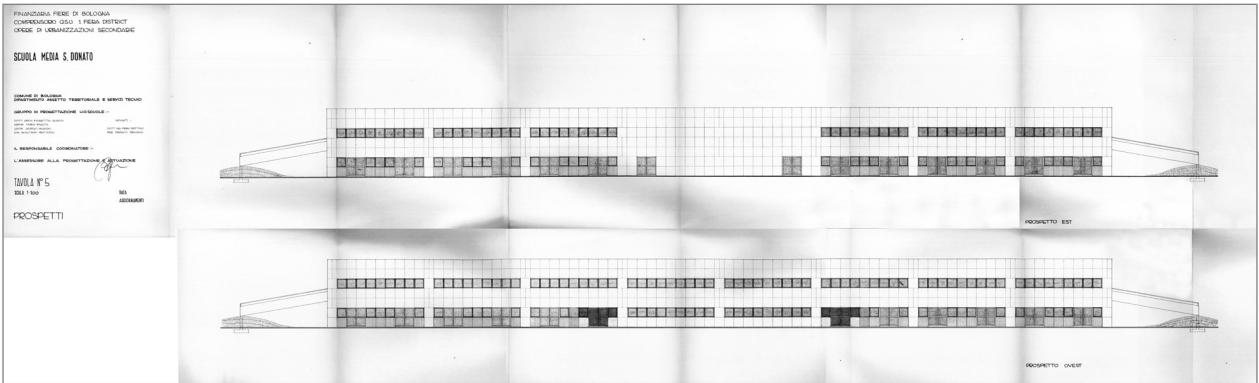
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



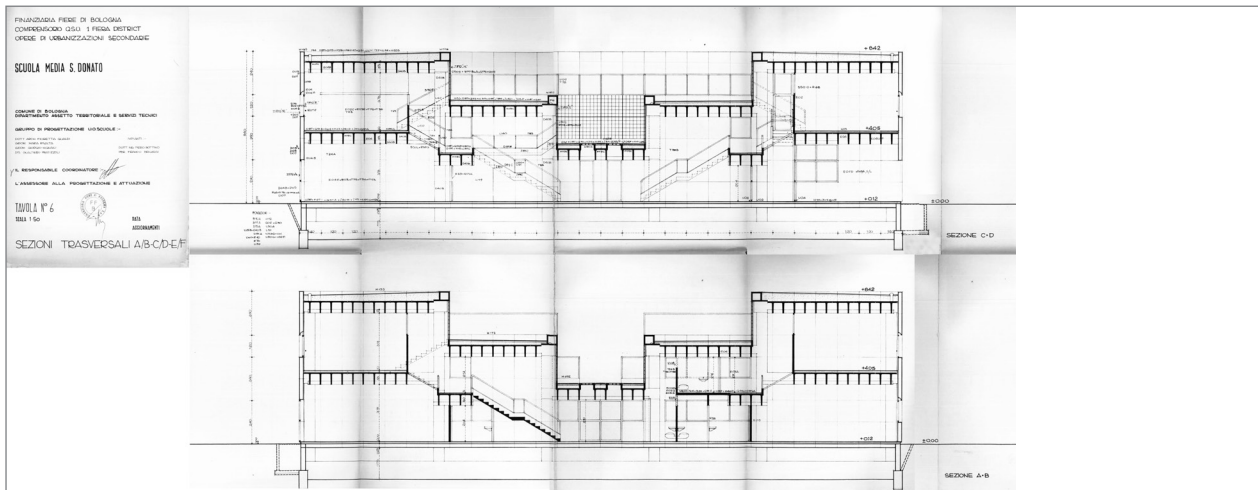
Pianta piano terra



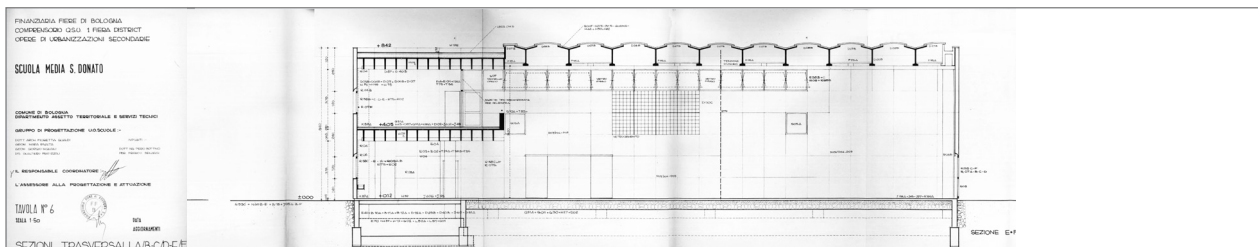
Pianta piano primo



Prospetti longitudinali



Sezione trasversale n. 1, 2



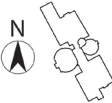
Sezione trasversale n. 3


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



11. SCUOLE “SAFFI”



DATI GENERALI	
Nome	“Saffi” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.11
Quartiere	San Donato
Indirizzo	via A. Panzini, 1
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1971-1973
Progettisti	Arch. Bonomi
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A corridoio centrale
Tipo edilizio	Scuola estesa

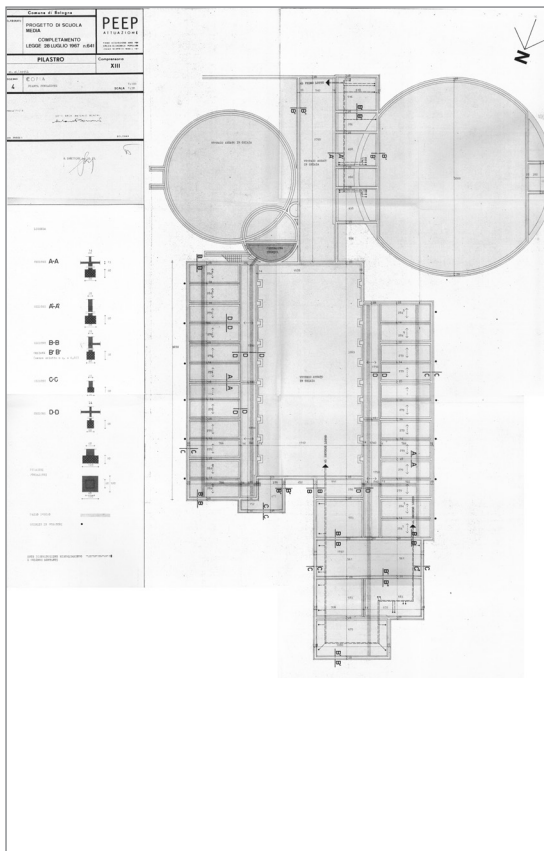
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	2.400
Altezza piano [m]	3,20
Volume netto riscaldato [m ³]	6.535
Volume lordo riscaldato [m ³]	7.680
Livelli	1
Rapporto di forma S/V	0,31
Rapporto di finestratura	Alto

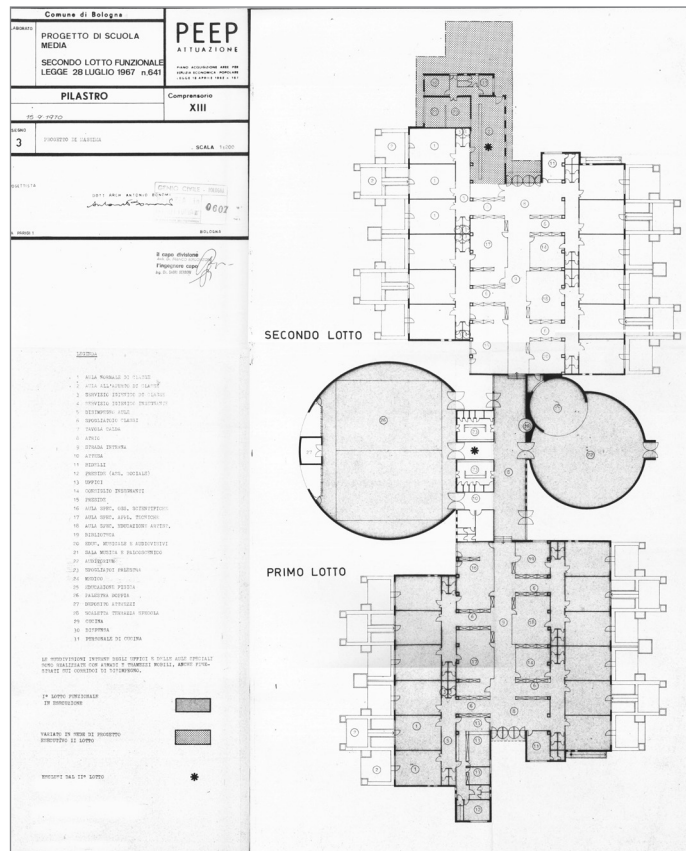
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Mista: pilastri e pareti portanti in muratura, travi in c.a. e solai prefabbricati		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Struttura mista	Travi prefabbricate Pilastri in muratura in opera	Travi in c.a. prefabbricate (RDB) Pilastri in muratura
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento prefabbricato	Piastrelle 1 cm Sottofondo in cls 8 cm Solaio in laterocemento 16 cm Sottofondo cemento magro 10 cm
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	Tegolo prefabbricato 30 cm Massetto in laterizio espanso Guaina impermeabilizzante 1 cm
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Mattone
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro	Vetro 0,5 cm Infissi 7 cm
Palestra	“Sistema BiniShelter” (brevetto Arch. D. Bini)	Sistema continuo in opera mediante teloni aerostatici	Guscio sottile in c.a.

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●				●			
Pilastrature d'angolo								
Tamponamenti esterni	●						●	●
Marcapiani e cornicioni				●				
Copertura								●

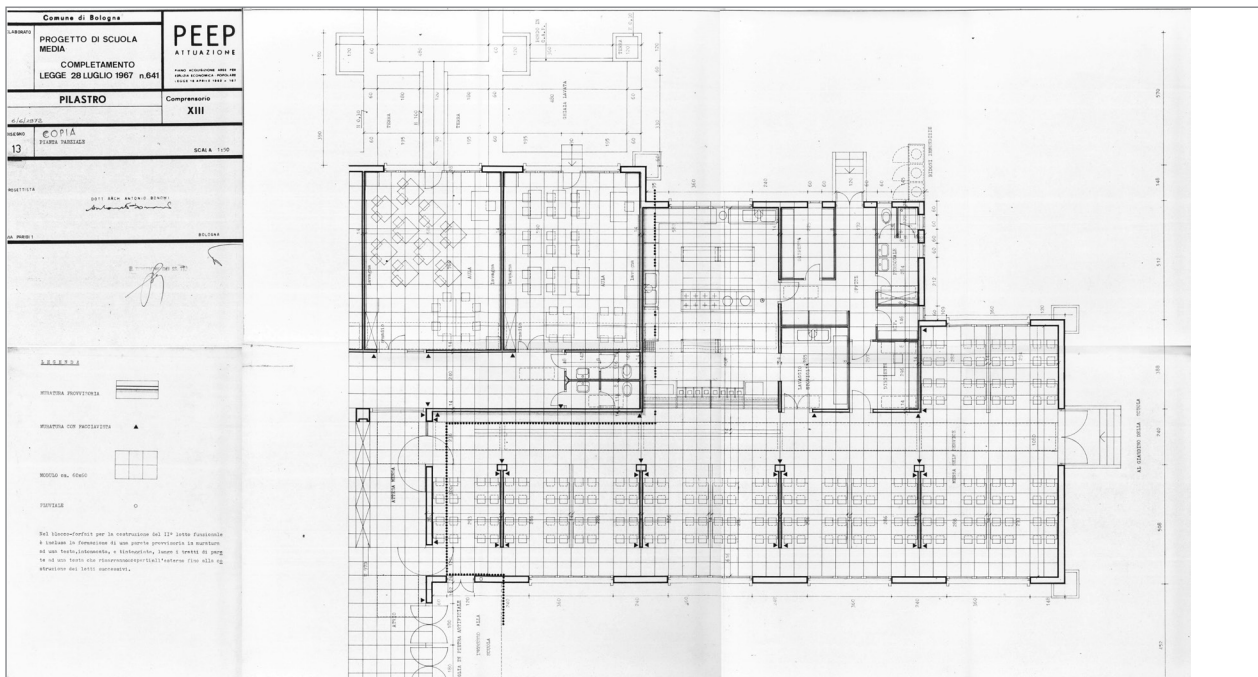
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



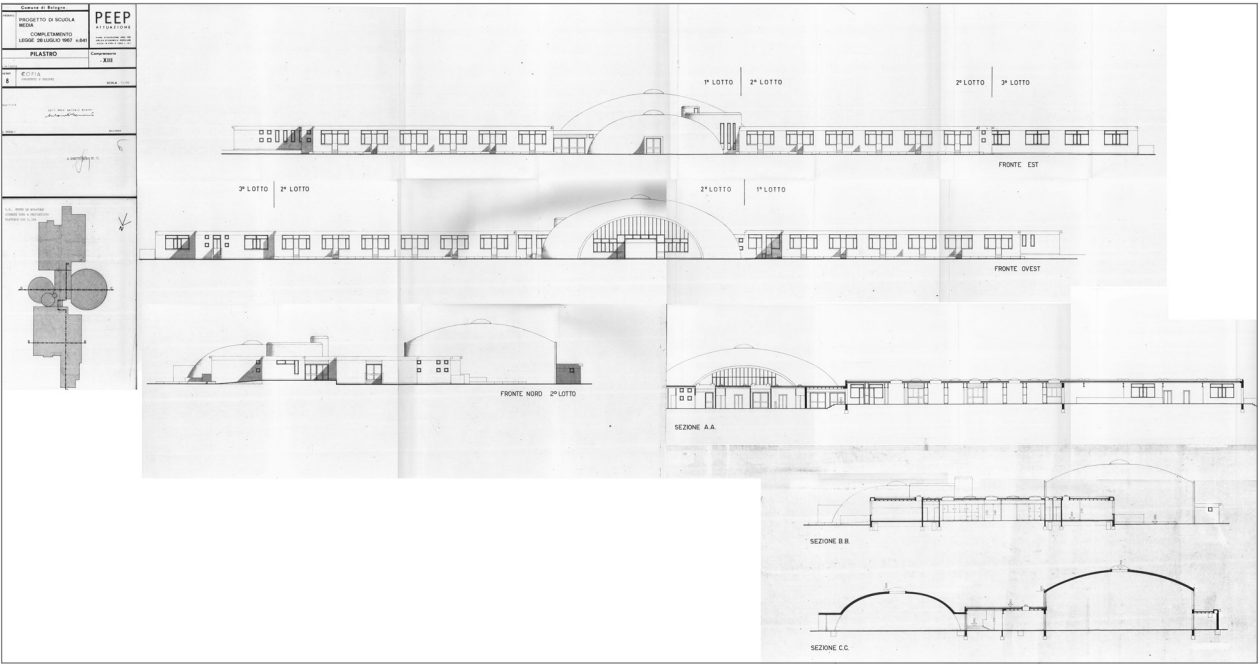
Pianta fondazioni



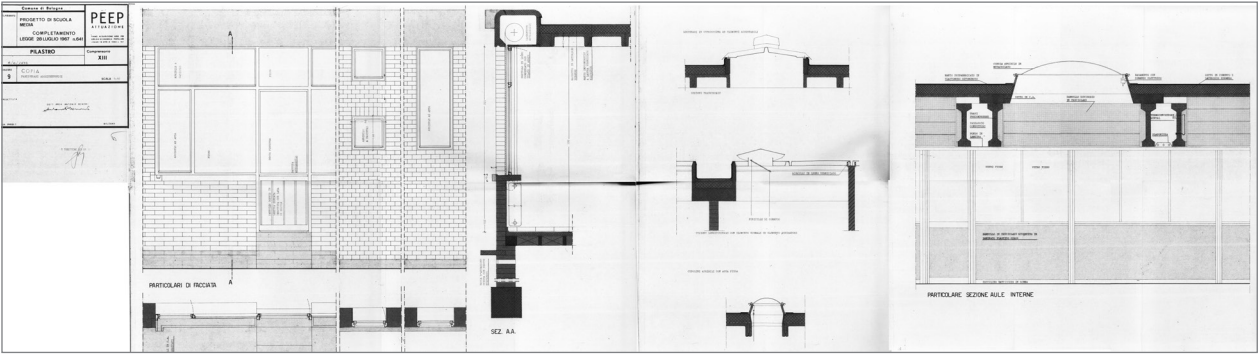
Progetto di massima



Pianta piano terra (parziale)



Prospetti e sezioni




Particolari costruttivi: tamponamenti e finestre


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



12. SCUOLE “GUIDO RENI”



DATI GENERALI	
Nome	“Zamboni” (scuole primarie) - “Guido Reni” (scuole secondarie I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.16
Quartiere	San Donato
Indirizzo	vicolo Bolognetti, 10
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1850 ca.
Progettisti	np
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	1950 - Ripristino danni di guerra 1993 - Interventi di manutenzione straordinaria
Modello distributivo	A corridoio (centrale o laterale)
Tipo edilizio	Scuola a blocco

PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

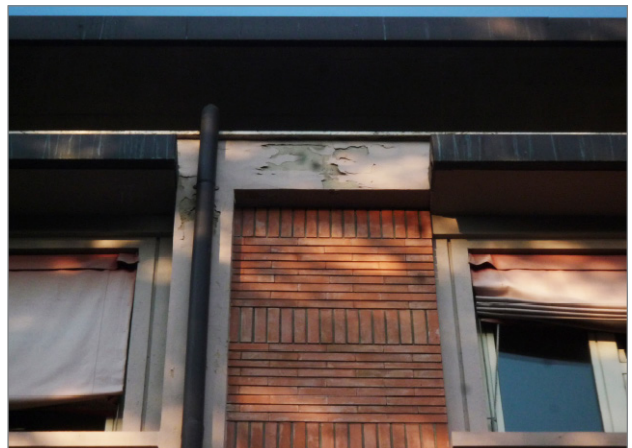
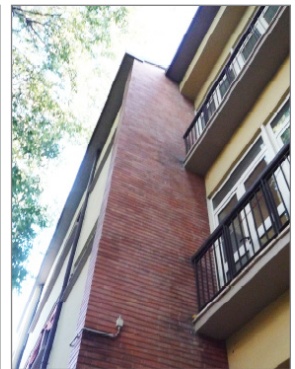
CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	3.162
Altezza piano [m]	3,5
Volume netto riscaldato [m ³]	10.450
Volume lordo riscaldato [m ³]	13.700
Livelli	3
Rapporto di forma S/V	0,23
Rapporto di finestratura	Medio

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Muratura portante		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Muratura portante	Muri portanti	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Orizzontamenti	Piano tipo	Solaio in laterocemento	Pavimentazione Sottofondo cemento magro Solaio
Copertura	Falde	Solaio di copertura	Solaio in laterocemento Coppi
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / in legno Vetro semplice / Doppio vetro	Vetro Infissi

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●				●			
Tamponamenti esterni					●		●	
Marcapiani e cornicioni					●		●	●
Copertura								



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



13. SCUOLE “JACOPO DELLA QUERCIA”



DATI GENERALI	
Nome	“Scandellara” (scuole primarie) - “J. della Quercia” (scuole secondarie I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.7
Quartiere	San Vitale
Indirizzo	via Scandellara, 54/3
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1972-1973
Progettisti	Arch. Merlo, Arch. Gualdi
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni - RDB Piacenza
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A unità funzionali
Tipo edilizio	Scuola estesa

PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

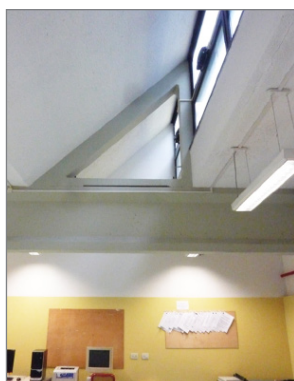
CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	4.506
Altezza piano [m]	3,10
Volume netto riscaldato [m ³]	15.400
Volume lordo riscaldato [m ³]	25.200
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,18
Rapporto di finestratura	Alto

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale		Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato	
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in c.a. prefabbricato	Piastrelle gres 1 cm Massetto cls 5 cm Solaio in c.a. 20 cm
	Piano primo	Solaio in laterocemento prefabbricato	Intonaco interno 1 cm Solaio in laterocemento 26 cm Massetto di pendenza 5 cm Guaina bituminosa 0,5 cm
Copertura	Inclinata a shed	Solaio in c.a. prefabbricato	Solaio in c.a. 20 cm Guaina bituminosa 0,5 cm
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Strato isolante lana di vetro Mattone Intonaco esterno
	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio isolante	Strato in cls Strato isolante Strato in cls
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / Infissi in alluminio Vetro semplice / Doppio vetro con camera	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm Intercapedine 0,6 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●							
Pilastrature d'angolo	●		●					
Tamponamenti esterni	●						●	
Marcapiani e cornicioni							●	
Copertura								●



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



14. SCUOLE “IRNERIO”



DATI GENERALI	
Nome	“Ercolani” (scuole primarie) - “Irnerio” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.6
Quartiere	San Vitale
Indirizzo	via A. Finelli, 2
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1963-1967
Progettisti	Arch. Rizzi
Impresa costruttrice	Antonio De Leo
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	1950 ca. - Rifacimento palestra e copertura intero edificio per rimozione amianto (eternit)
Modello distributivo	A corridoio centrale
Tipo edilizio	A blocco accorpato

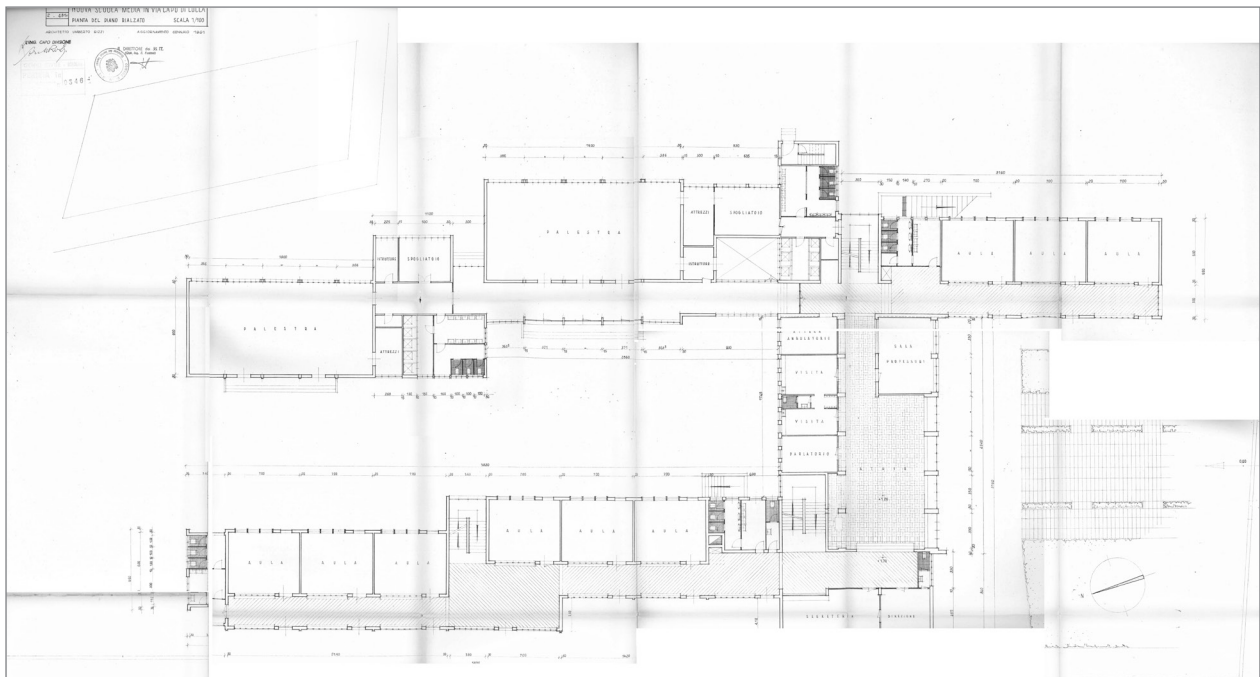
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	9.845
Altezza piano [m]	4,0
Volume netto riscaldato [m ³]	144.540
Volume lordo riscaldato [m ³]	148.650
Livelli	4
Rapporto di forma S/V	0,35
Rapporto di finestratura	Alto

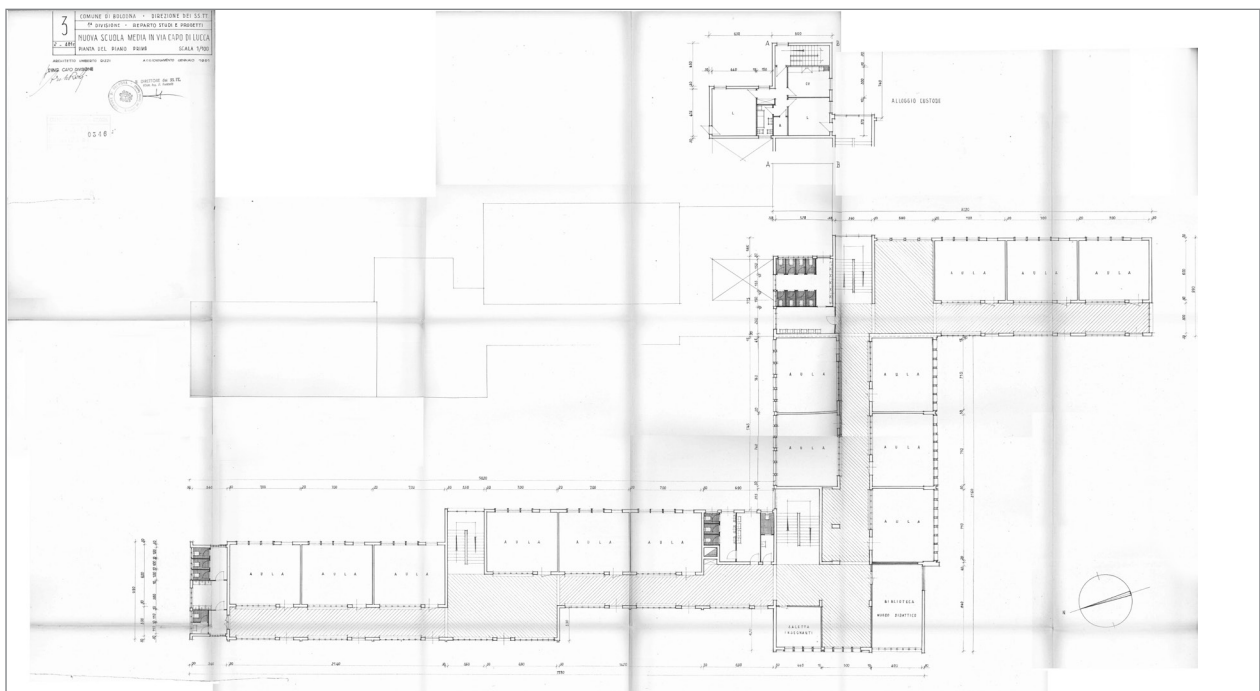
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato in opera		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrati e travi in opera	C.a.
Orizzontamenti	Piano tipo	Solaio in laterocemento	Soletta in cls 4 cm Monoblocchi in laterizio 21 cm Piastrille 1 cm Sottofondo cls 4 cm
Copertura	Inclinata	Solaio di copertura	Solaio in laterizio armato Lastre di eternit (rimosse)
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Mattone pieno
	Foratoni	Pareti esterne	Foratoni in cotto e camera d'aria
	Pannelli in cls	Pareti esterne	Pannelli prefabbricati in cls
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / Infissi in legno Vetro semplice	Vetro 0,4 cm Infissi 5 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●			●				
Pilastrature d'angolo	●							
Tamponamenti esterni	●				●		●	
Marcapiani e cornicioni					●			
Copertura								●

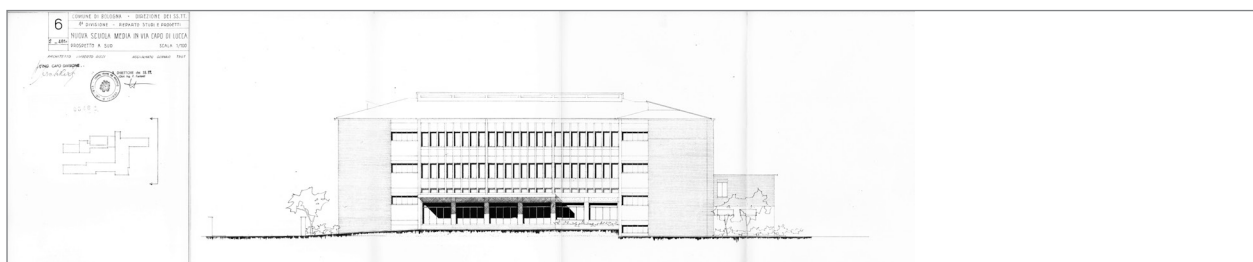
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



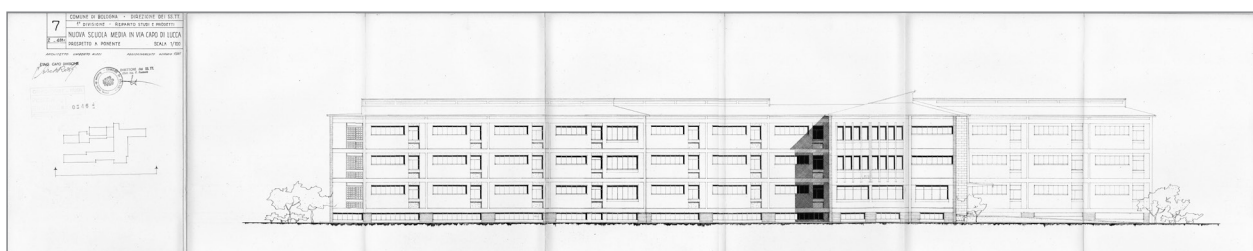
Pianta piano terra



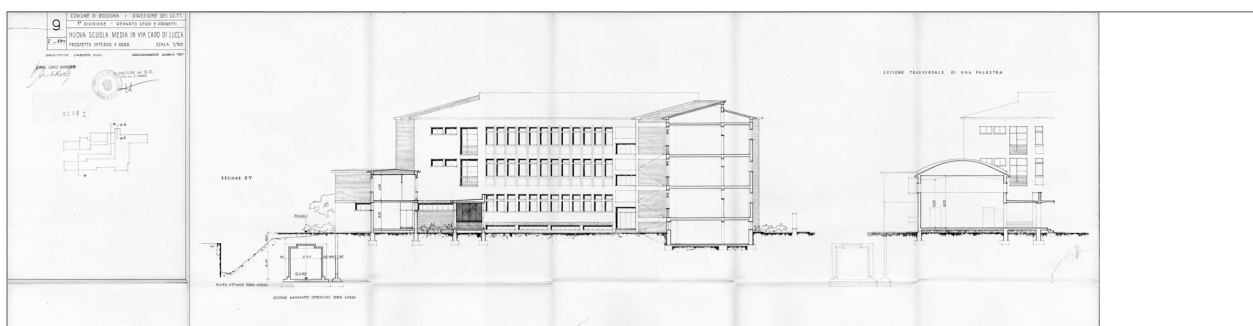
Pianta piano primo



Prospetto sud



Prospetto Ovest



Prospetto Nord e sezione trasversale



Prospetto Est e sezione corpo centrale

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



15. SCUOLE “ROLANDINO DE’ PASSEGGERI”



DATI GENERALI	
Nome	“Rolandino de’ Passeggeri” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata della scuola statale Rolandino-Pepoli
Quartiere	Santo Stefano
Indirizzo	via G. Pascoli, 5
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1900 ca.
Progettisti	np
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A corridoio centrale
Tipo edilizio	A blocco accorpato

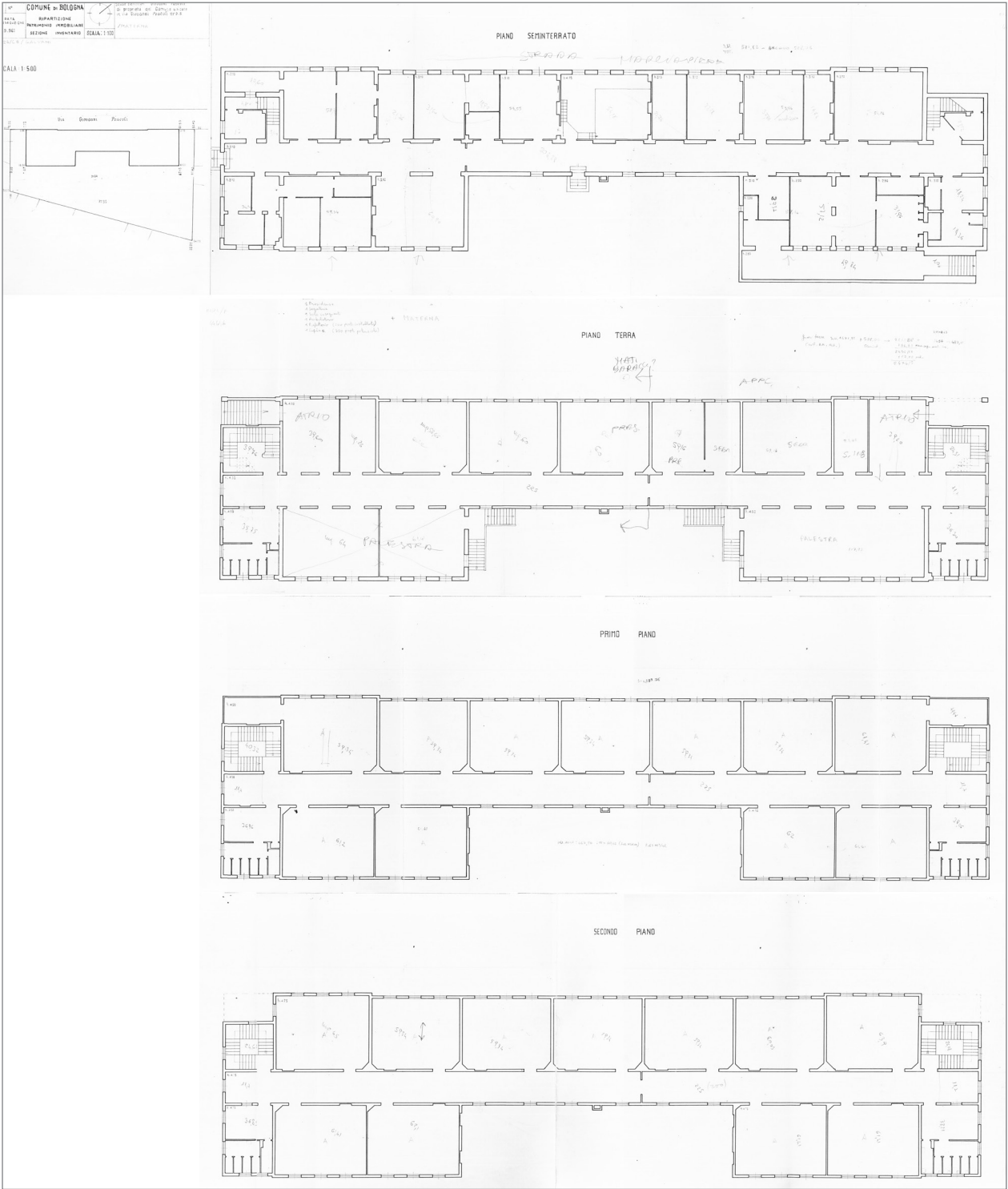
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	1.130
Altezza piano [m]	4
Volume netto riscaldato [m ³]	17.570
Volume lordo riscaldato [m ³]	20.350
Livelli	4 (compreso seminterrato)
Rapporto di forma S/V	0,29
Rapporto di finestratura	Medio

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Muratura portante		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Muratura portante	Muri portanti	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Orizzontamenti	Piano tipo	Solaio in laterocemento	Piastrelle 1 cm Sottofondo cemento magro 4 cm Soletta in cls 8 cm
Copertura	Falde	Solaio di copertura	Intonaco interno 1 cm Blocco solaio 18 cm Soletta in cls 4 cm Guaina bituminosa 0,5 cm Coppi
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / in legno Vetro semplice	Vetro 0,3 cm Infissi 5 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●		●		●			
Tamponamenti esterni			●		●		●	●
Marcapiani e cornicioni					●		●	
Copertura								●

DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



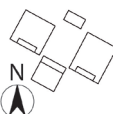
Piante piano seminterrato, terra, primo, secondo

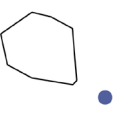
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



16. SCUOLE “PEPOLI”



DATI GENERALI	
Nome	“Carlo Pepoli” (scuole secondarie I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.14
Quartiere	Santo Stefano
Indirizzo	largo Cardinale Lercaro, 14
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1971-1973
Progettisti	Arch. Merlo, Arch. Gualdi
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni - RDB Piacenza
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A unità funzionali
Tipo edilizio	Scuola estesa

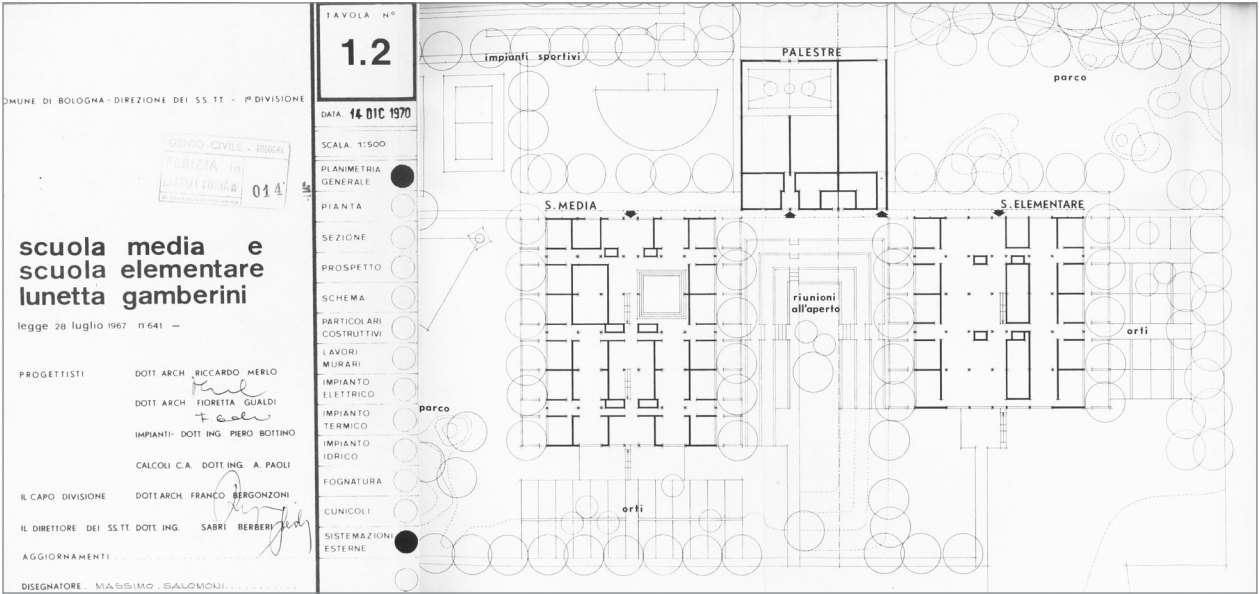
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	4.506
Altezza piano [m]	3,10
Volume netto riscaldato [m ³]	15.400
Volume lordo riscaldato [m ³]	25.200
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,18
Rapporto di finestratura	Alto

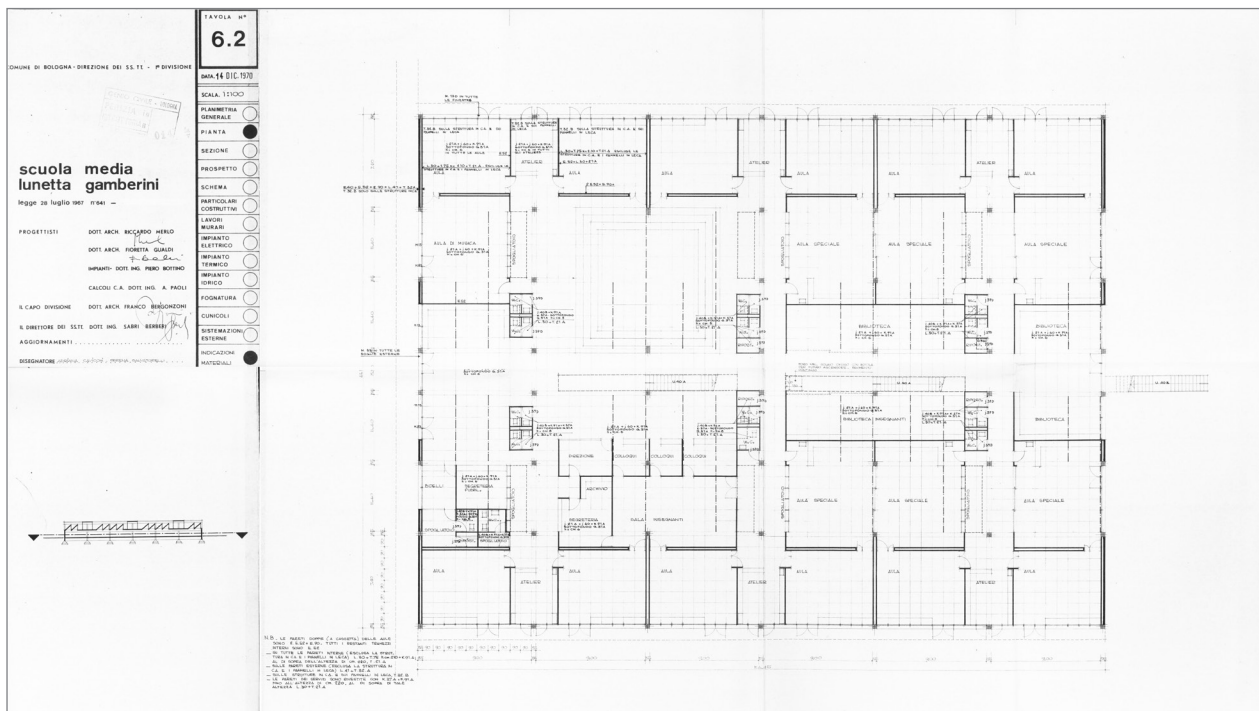
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale		Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato	
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in c.a. prefabbricato	Piastrelle gres 1 cm Massetto cls 5 cm Solaio in c.a. 20 cm
	Piano primo	Solaio in laterocemento prefabbricato	Intonaco interno 1 cm Solaio in laterocemento 26 cm Massetto di pendenza 5 cm Guaina bituminosa 0,5 cm
Copertura	Inclinata a shed	Solaio in c.a. prefabbricato	Solaio in c.a. 20 cm Guaina bituminosa 0,5 cm
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Strato isolante lana di vetro Mattone Intonaco esterno
	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio isolante	Strato in cls Strato isolante Strato in cls
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / Infissi in alluminio Vetro semplice / Doppio vetro con camera	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm Intercapedine 0,6 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●			●				
Pilastrature d'angolo	●		●					
Tamponamenti esterni	●						●	
Marcapiani e cornicioni								
Copertura								●

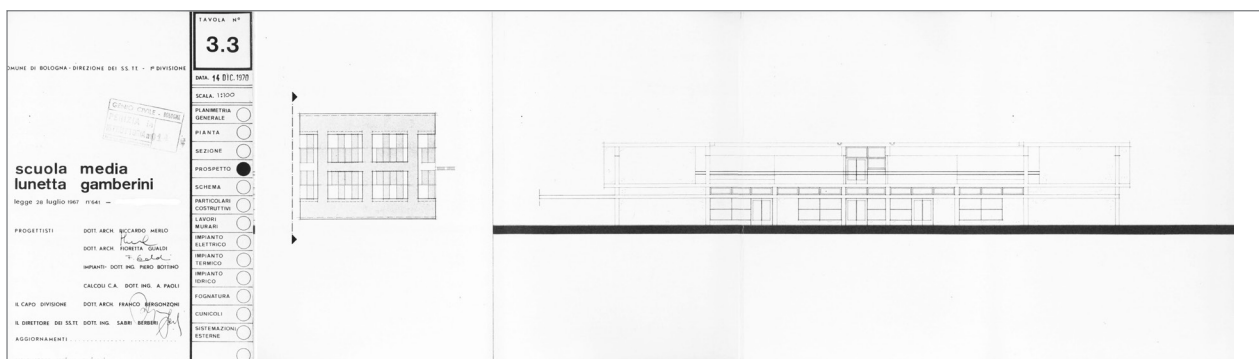
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



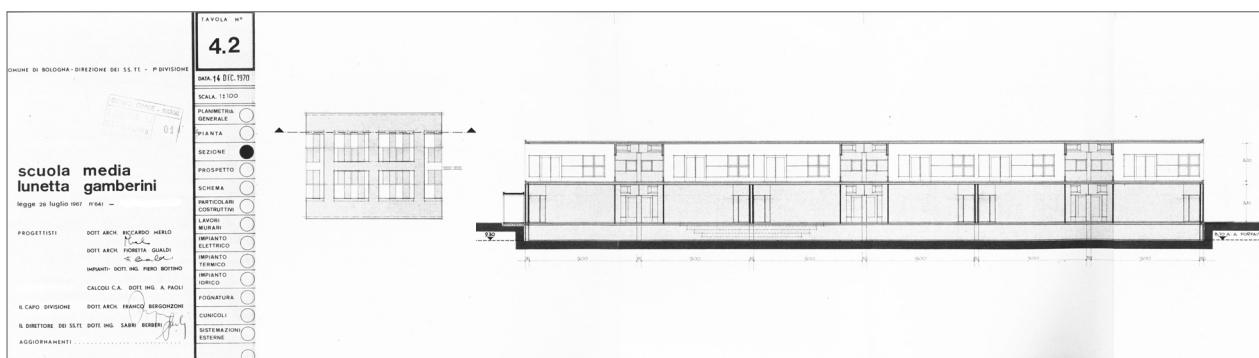
Planimetria generale



Pianta piano terra (Scuola Media)



Prospetto Sud (Scuola Media)



Sezione trasversale (Scuola Media)


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



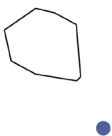
17. SCUOLE “LEONARDO DA VINCI”



DATI GENERALI DEL FABBRICATO SCOLASTICO ORIGINARIO

Nome	1978-2011: “Ferrari” (infanzia), “Leonardo Da Vinci” (scuole secondarie di I grado) da 09/2014: Polo Scolastico “Buon Pastore” (infanzia, primaria, secondaria I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.13
Quartiere	Santo Stefano
Indirizzo	via Buon Pastore, 4
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1977-1978
Progettisti	np
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	2011-2014 Adeguamento sismico ed energetico e riorganizzazione di spazi interni
Modello distributivo	A corridoio centrale
Tipo edilizio	A blocco

PARAMETRI CLIMATICI

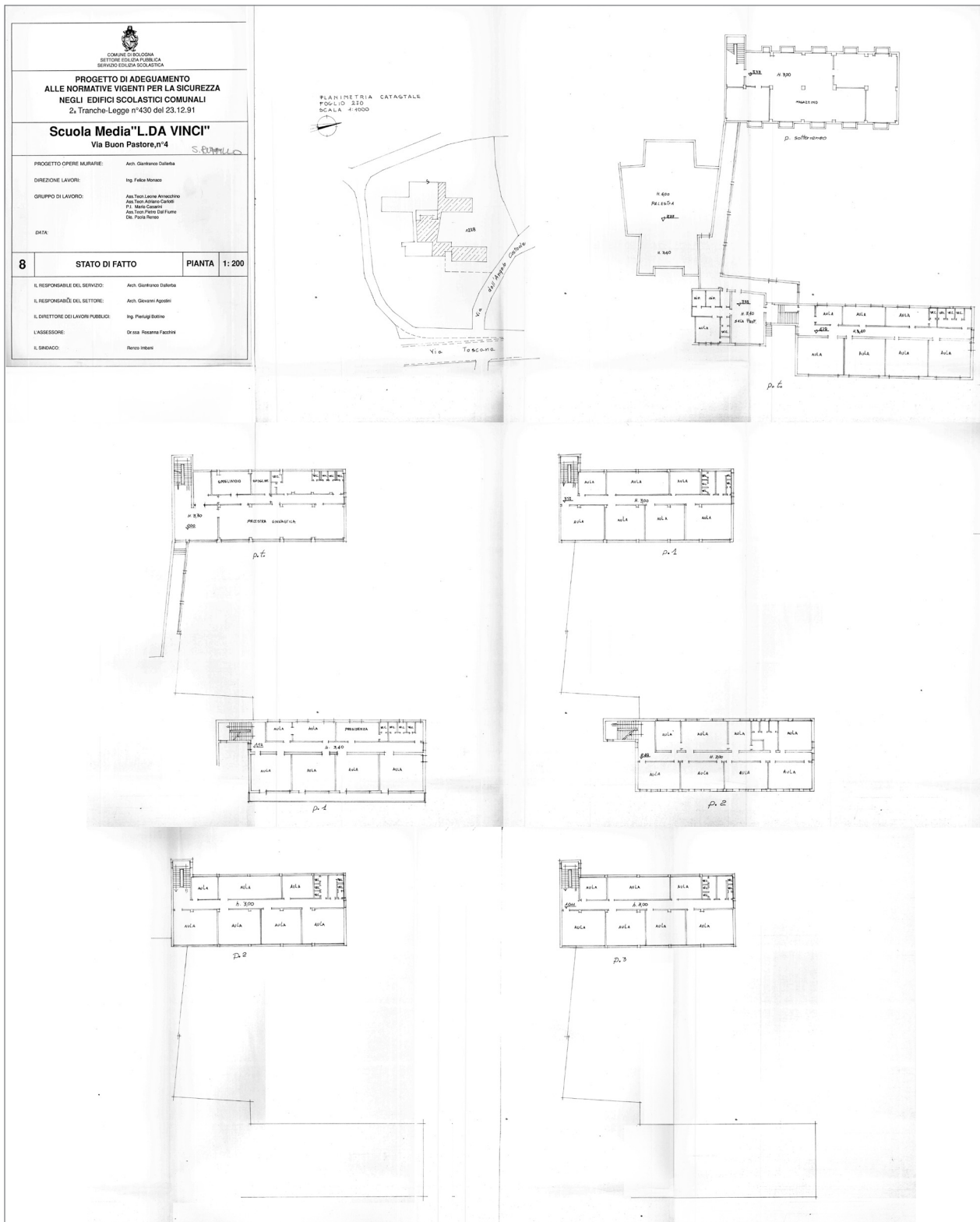
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	1.541
Altezza piano [m]	3,0
Volume netto riscaldato [m ³]	4.724
Volume lordo riscaldato [m ³]	5.414
Livelli	3
Rapporto di forma S/V	0,33
Rapporto di finestratura	Alto

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato in opera		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi in opera	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento	Linoleum 1 cm Massetto in cls 4 cm Solaio in laterocemento 25 cm Intonaco 1 cm
	Sottotetto	Solaio in laterocemento	Battuto 4 cm Solaio in laterocemento 25 cm Intonaco 1 cm
Copertura	A falde inclinate	Solaio di copertura	Intonaco interno 1 cm Solaio in laterocemento 20 cm Massetto pendenzato 5 cm Coppi
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno 1 cm Mattoni forati 25 cm Strato cls 4,5 cm Intonaco esterno 0,5 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi in alluminio Vetro doppio con camera	Vetro 0,5 cm Infissi 7 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI
<p>I dati generali e i documenti di archivio riportati all'interno di questa scheda tecnica si riferiscono al fabbricato originario sede della scuola secondaria di I grado "Leonardo Da Vinci".</p> <p>Tra novembre 2011 e giugno 2014 si effettua un importante intervento di completamento del polo scolastico, concepito in due lotti funzionali autonomi. Il I lotto funzionale, aperto all'utenza dal 2009, deriva dalla demolizione della vecchia palestra per la costruzione di un nuovo edificio scolastico comprendente scuola di infanzia, palestra, auditorium e biblioteca, connessi all'edificio esistente mediante un collegamento coperto. Il II lotto funzionale, comprendente il complesso esistente di scuola primaria e secondaria di I grado, riguarda interventi di adeguamento sismico (interventi su fondazioni, pilastri, travi e solai), adeguamento energetico (rifacimento facciate con sistema a cappotto, sostituzione serramenti esterni, installazione impianto solare termico), e riorganizzazione degli spazi esterni. Al momento della redazione delle presenti schede, non è pertanto possibile svolgere una analisi dello stato conservativo delle componenti strutturali del fabbricato originario (1977-78) che, durante il periodo di svolgimento del progetto di ricerca è oggetto di intervento di ristrutturazione.</p>


DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO




Piante dello stato originario

18. SCUOLE “GUINIZELLI”



DATI GENERALI	
Nome	“Guinizelli” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.8
Quartiere	Saragozza
Indirizzo	via Cà Selvatica, 11
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1970 ca.
Progettisti	np
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A corridoio centrale
Tipo edilizio	A blocco

PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	7.172
Altezza piano [m]	3,50
Volume netto riscaldato [m ³]	28.760
Volume lordo riscaldato [m ³]	32.000
Livelli	5 (compreso seminterrato)
Rapporto di forma S/V	0,22
Rapporto di finestratura	Alto

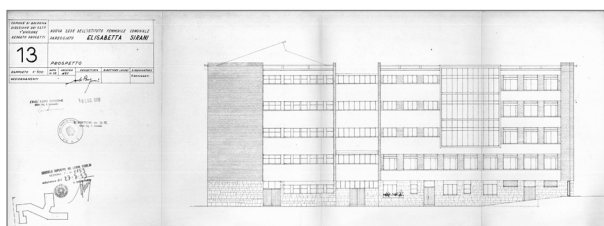
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Muratura portante		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Muratura portante	Muri portanti	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Orizzontamenti	Piano tipo	Solaio in laterocemento	Pavimentazione Sottofondo cemento magro Solaio in laterocemento Intonaco
Copertura	Falde inclinate	Solaio di copertura	Intonaco interno Blocco solaio in laterocemento Soletta in cls Guaina bituminosa Coppi
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Intonaco esterno
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Vetro doppio con camera	Vetro 0,3 cm Infissi 5 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI- FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	●		●		●			
Tamponamenti esterni	●		●		●		●	●
Marcapiani e cornicioni	●				●		●	
Copertura								●

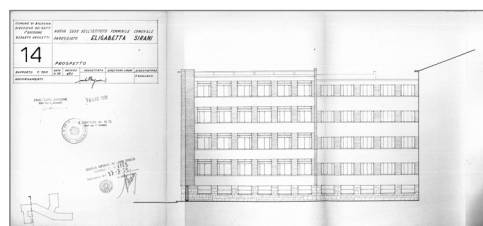
DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



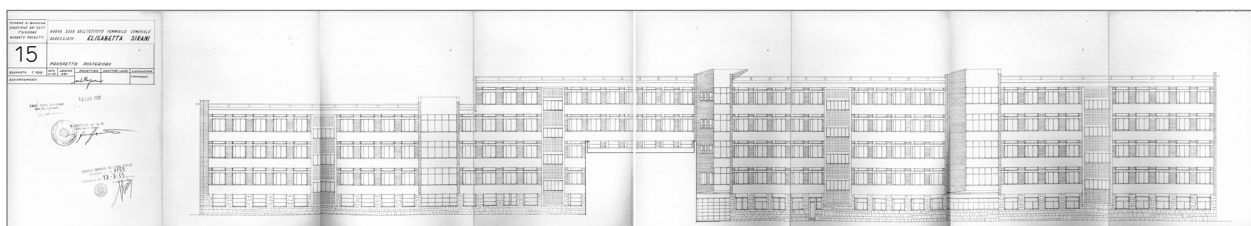
Prospetto n. 1 (su via Ca' Selvatica)



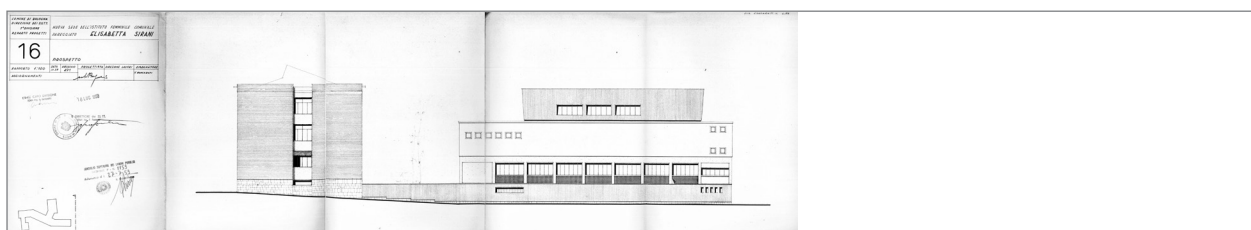
Prospetto n. 2



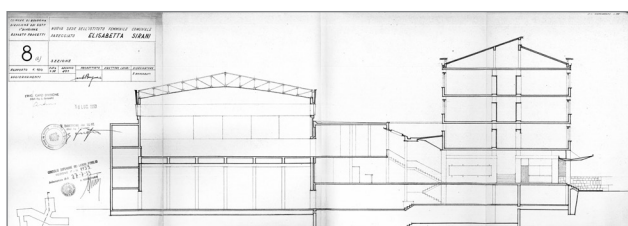
Prospetto n. 3



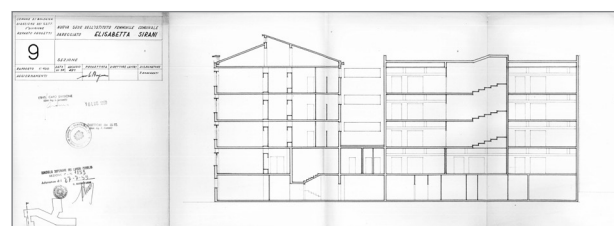
Prospetto posteriore n. 4



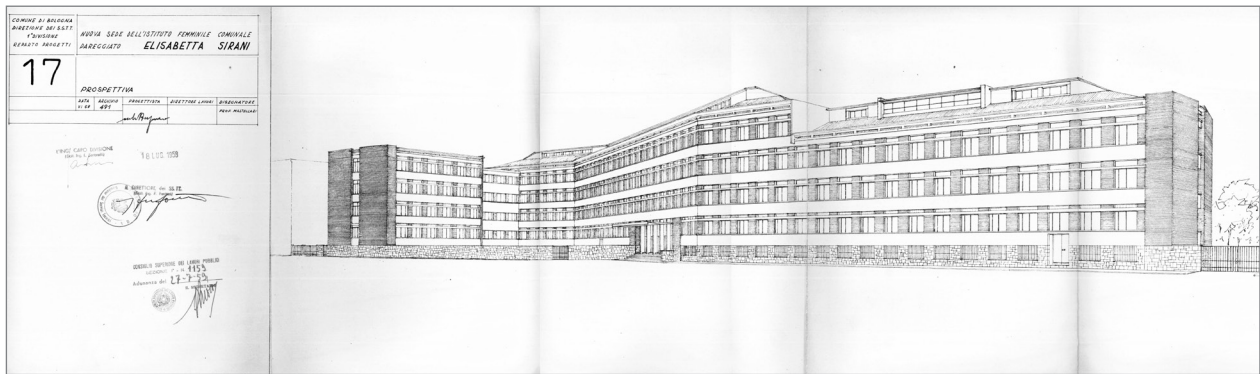
Prospetto n. 5



Sezione n. 1




Sezione n. 2

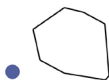


Prospettiva

19. SCUOLE “CARRACCI”



DATI GENERALI	
Nome	“Carracci” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.8
Quartiere	Saragozza
Indirizzo	via F. Battaglia, 18
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1976-1978
Progettisti	Arch. Gualdi, Ing. Bottino, Geom. Gallieri
Impresa costruttrice	np
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	2017 - Prevista consegna del fabbricato demolito e ricostruito (dal 2010 dichiarato inagibile per problemi strutturali)
Modello distributivo	A unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra

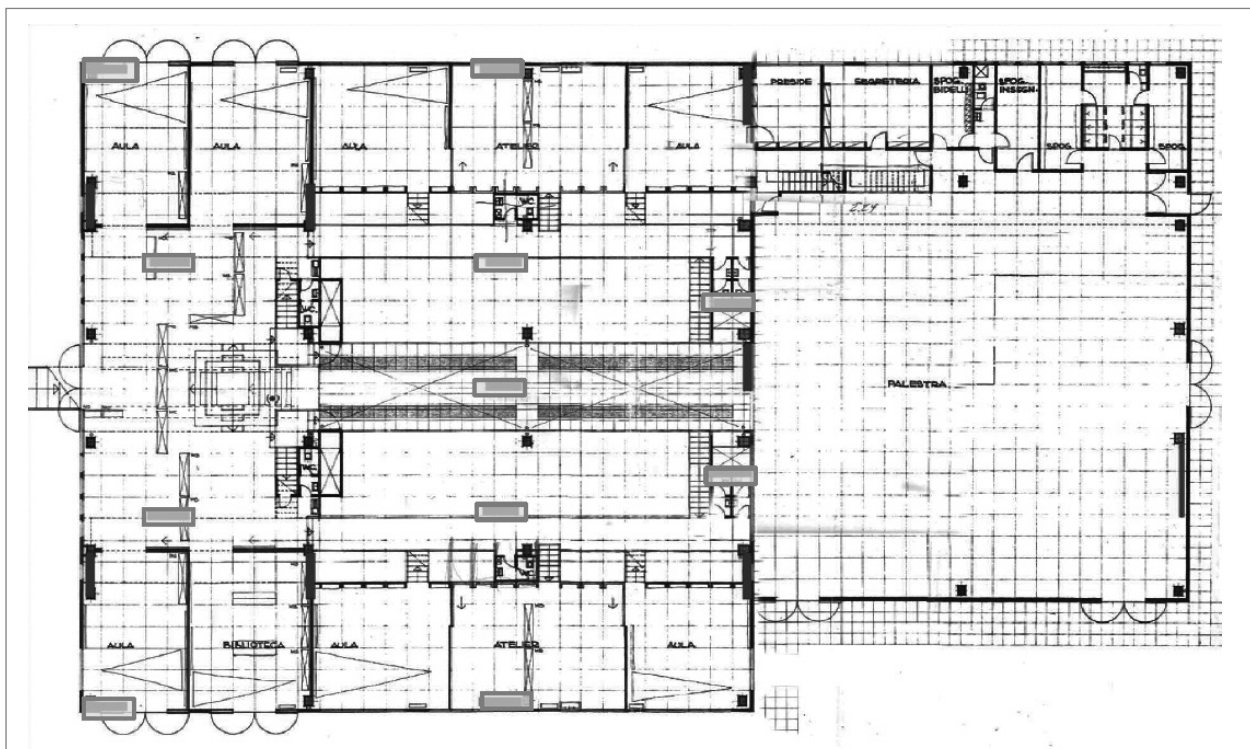
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	7.560
Altezza piano [m]	3,00
Volume netto riscaldato [m ³]	15.450
Volume lordo riscaldato [m ³]	18.600
Livelli	4
Rapporto di forma S/V	0,55
Rapporto di finestratura	Alto

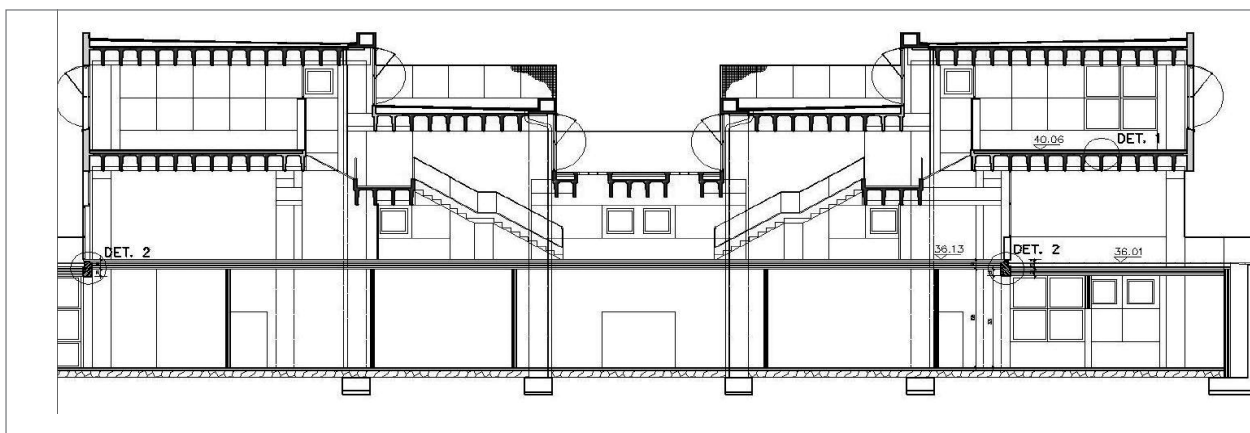
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastri e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in laterocemento prefabbricato	Piastrelle gres 1 cm Sottofondo cemento magro 5 cm Massetto cls, sabbia, ghiaia 15 cm
	Piano tipo	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	Pavimentazione Sottofondo in cls Tegolo prefabbricato
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	Tegolo prefabbricato 30 cm Isolante 1,5 cm Guaina 1 cm Celenit 2 cm
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio isolante	Strato in cls Strato isolante Strato in cls
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro con camera	Vetro 0,4 cm Infissi 5 cm Intercapedine 0,9 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI
<p>Nel 2010 il fabbricato viene dichiarato inagibile per gravi problemi strutturali, comportando il trasferimento degli alunni presso l'I.C. n.8 "Guinizelli" sito in via Cà Selvatica (quartiere Saragozza), al fine di effettuare un importante intervento di demolizione e ricostruzione della scuola entro il 2017.</p> <p>Al momento della redazione delle presenti schede, non è pertanto possibile svolgere una analisi dello stato conservativo delle componenti strutturali del fabbricato che, durante il periodo di svolgimento del progetto di ricerca, risulta inaccessibile. In letteratura, sono comunque stati svolti numerosi studi e analisi sullo stato conservativo del fabbricato, finalizzati alla valutazione del livello di degrado, considerato di notevole entità dal punto di vista della vulnerabilità sismica e della sicurezza strutturale, e alla stima dei costi-benefici di un eventuale intervento. In particolare, i problemi strutturali individuati riguardano i nodi tra gli elementi costruttivi prefabbricati che, se sottoposti a sollecitazioni esterne orizzontali quali quelle sismiche, portano ai classici danni che caratterizzano il comportamento degli edifici prefabbricati: perdita degli appoggi trave-pilastro, perdita di connessione tra gli elementi portanti, scollamento dei pannelli di tamponamento esterno.</p>

DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO




Pianta piano terra




Sezione trasversale (porzione)

20. SCUOLE “FARINI”



DATI GENERALI	
Nome	“Padre Marella” (scuole primarie) - “Farini” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.12
Quartiere	Savena
Indirizzo	via Populonia, 11
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	1971-1974
Progettisti	Arch. Merlo, Arch. Gualdi
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni - RDB Piacenza
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	np
Modello distributivo	A unità funzionali
Tipo edilizio	Scuola estesa

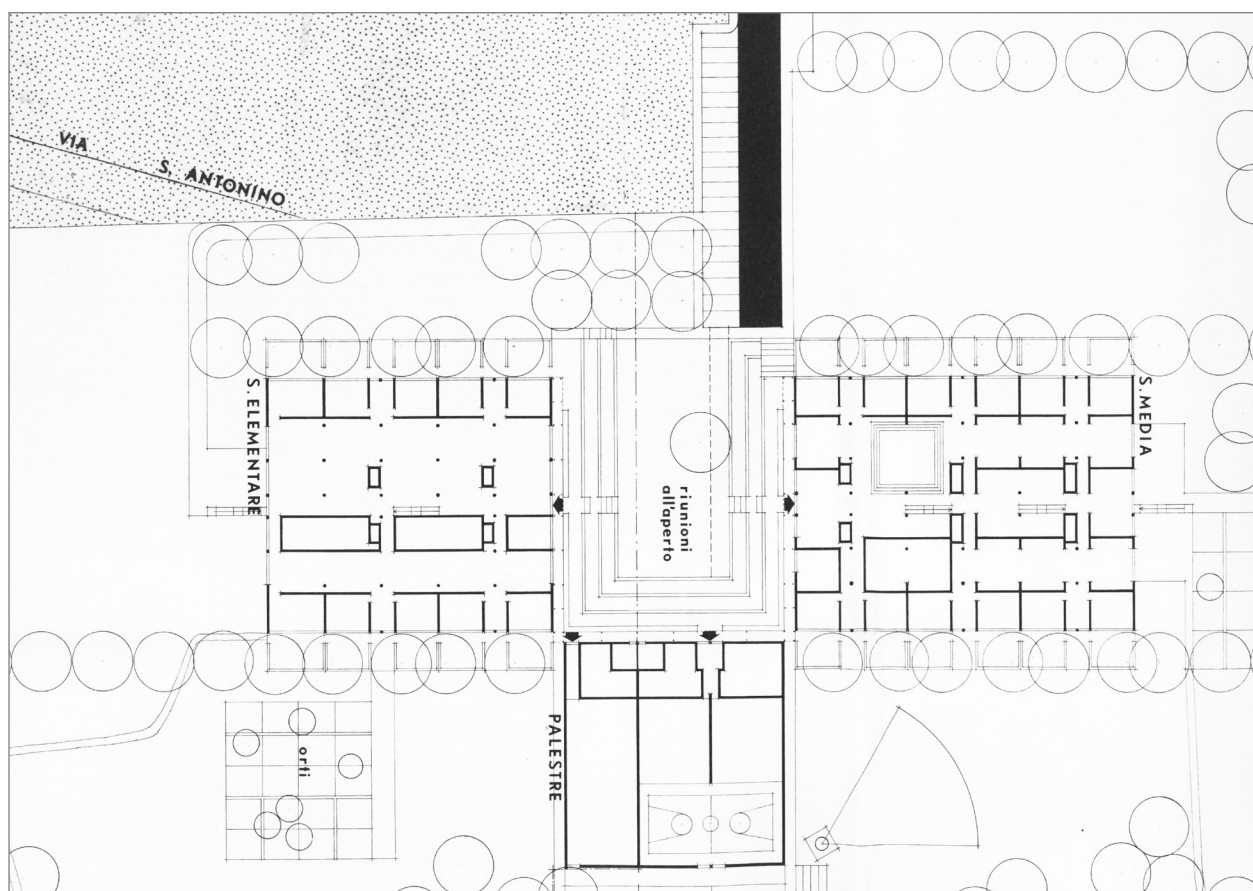
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	4.506
Altezza piano [m]	3,10
Volume netto riscaldato [m ³]	15.400
Volume lordo riscaldato [m ³]	25.200
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,18
Rapporto di finestratura	Alto

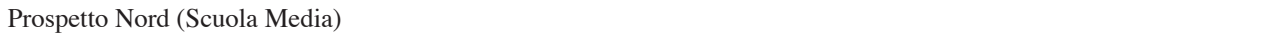
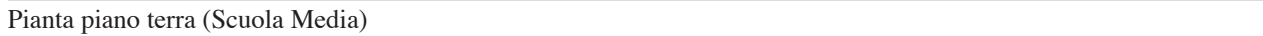
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale		Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato	
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastrini e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in c.a. prefabbricato	Piastrelle gres 1 cm Massetto cls 5 cm Solaio in c.a. 20 cm
	Piano primo	Solaio in tegoli prefabbricati	Intonaco interno 1 cm Tegoli prefabbricati 26 cm Massetto 5 cm
Copertura	Inclinata a shed	Solaio in c.a. prefabbricato	Solaio in c.a. 20 cm Guaina bituminosa 0,5 cm
Tamponamenti	Muratura	Pareti esterne	Intonaco interno Mattone Strato isolante lana di vetro Mattone Intonaco esterno
	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio isolante	Strato in cls Strato isolante Strato in cls
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici / Infissi in alluminio Vetro semplice / Doppio vetro con camera	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm Intercapedine 0,6 cm

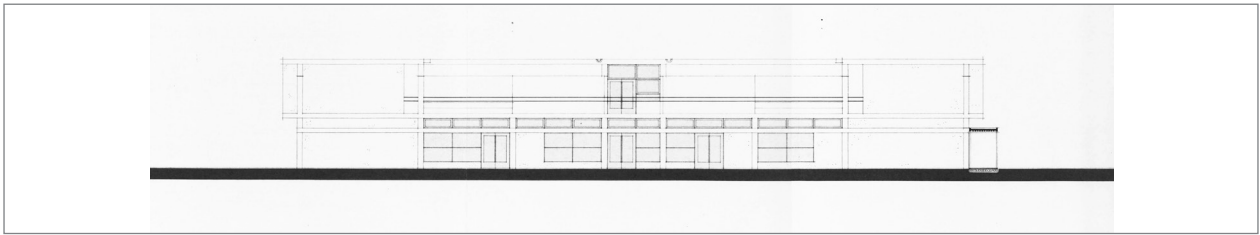
STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale	•			•				
Pilastrature d'angolo	•		•					
Tamponamenti esterni	•				•		•	
Marcapiani e cornicioni								
Copertura								•

DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO

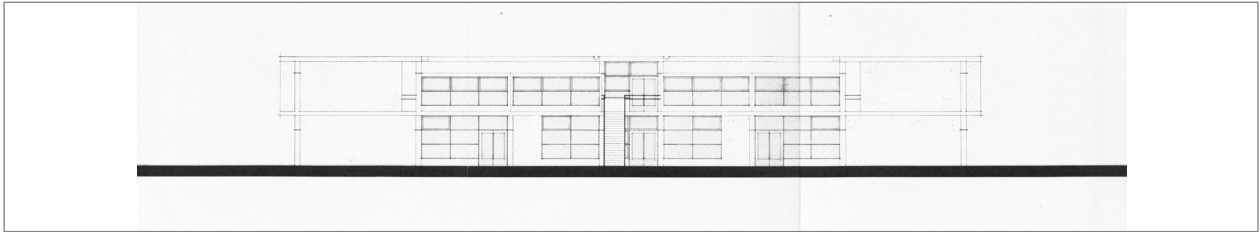


Planimetria generale

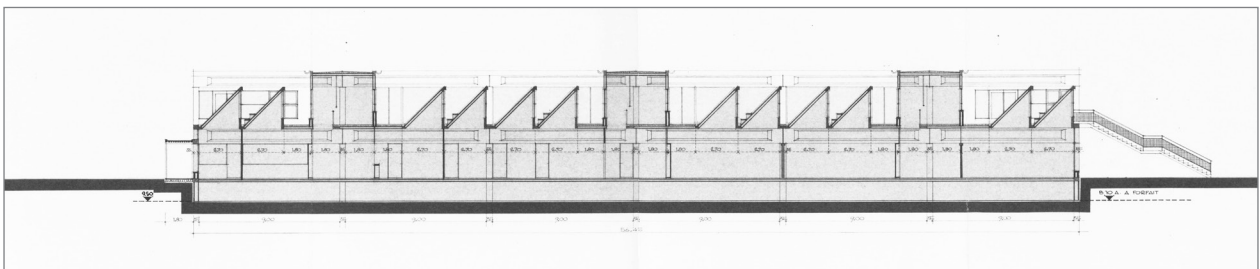




Prospetto Ovest (Scuola Media)



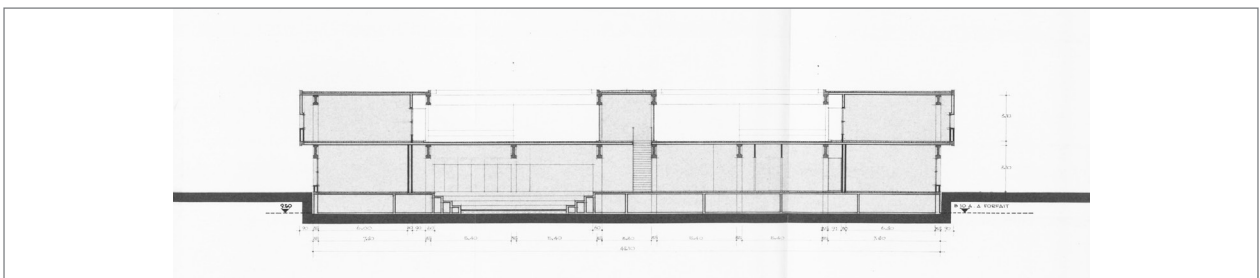
Prospetto Est (Scuola Media)



Sezione n. 1 (Scuola Media)



Sezione n. 2 (Scuola Media)




Sezione n. 3 (Scuola Media)


DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



21. SCUOLE “GUERCINO”



DATI GENERALI	
Nome	“Guercino” (scuole secondarie di I grado)
Tipologia	Sezione associata dell’I.C. n.9
Quartiere	Savena
Indirizzo	via L. Longo, 4
Localizzazione rispetto alla città	
Periodo di costruzione	fine 1970
Progettisti	Arch. Gualdi, Ing. Repetto, Geom. Gallieri, Geom. Mignani
Impresa costruttrice	Consorzio Cooperative Costruzioni - AMA
Destinazione d’uso originaria	Edificio adibito ad attività scolastica (E.7)
Eventuali ristrutturazioni	2012 - Ripristino connessioni nodi strutturali (post-sisma Maggio 2012)
Modello distributivo	A unità funzionali
Tipo edilizio	A piastra

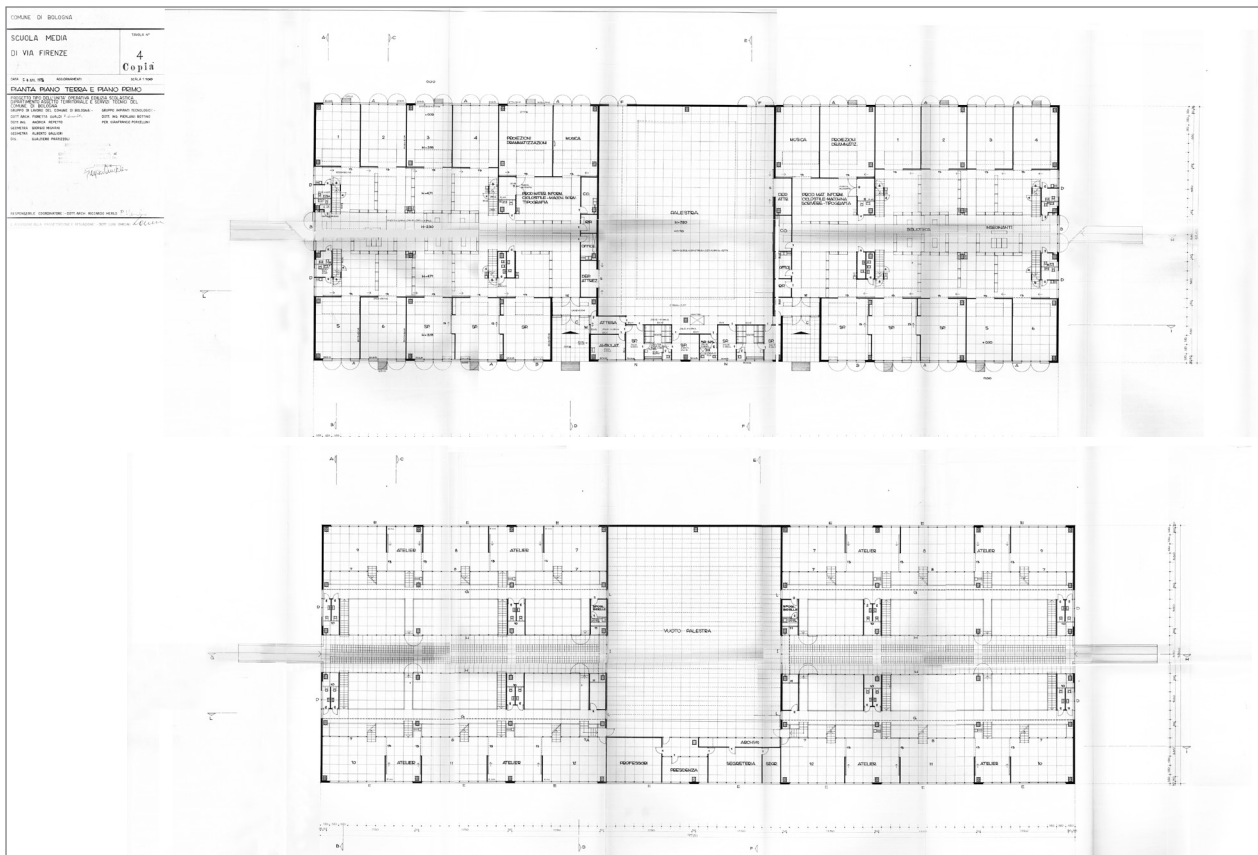
PARAMETRI CLIMATICI	
Altitudine [m]	54
Gradi giorno	2259
Zona climatica	E
Vento	Regione di riferimento A
Orientamento	

CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE	
Superficie [m ²]	4.400
Altezza piano [m]	3,70
Volume netto riscaldato [m ³]	21.164
Volume lordo riscaldato [m ³]	23.234
Livelli	2
Rapporto di forma S/V	0,43
Rapporto di finestratura	Alto

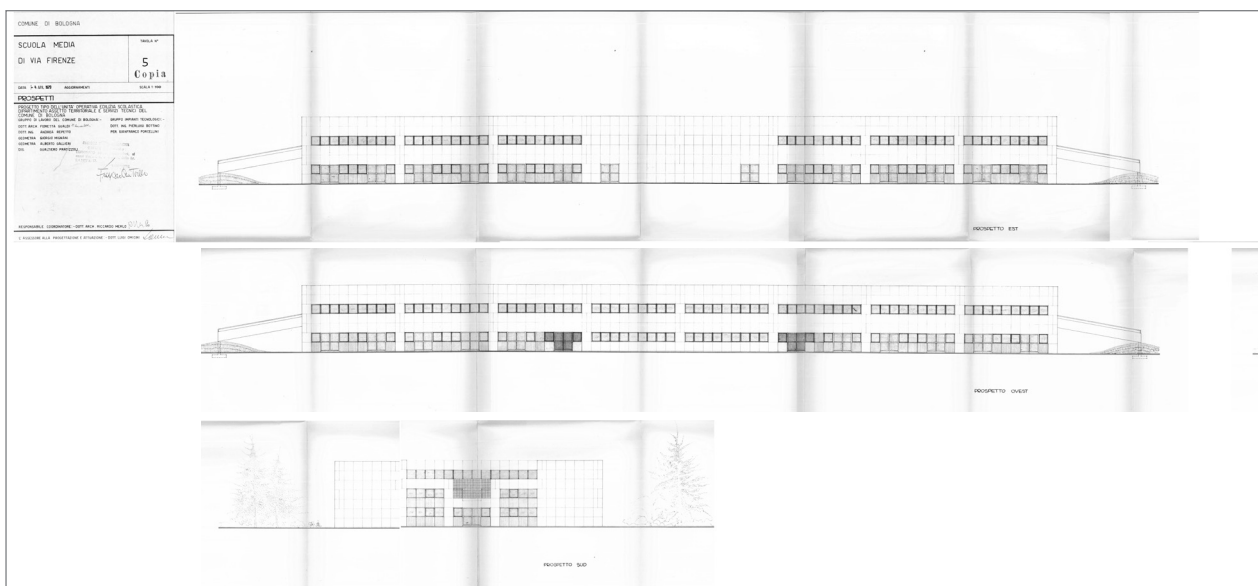
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE STRUTTURALI			
Tipologia strutturale	Puntiforme, a telaio in conglomerato cementizio armato prefabbricato		
ELEMENTI DI FABBRICA	SPECIFICAZIONE/ TIPOLOGIA COSTRUTTIVA	ELEMENTI/COMPONENTI COSTRUTTIVI	MATERIALI
Scheletro strutturale	Telaio in c.a.	Pilastri e travi prefabbricati	C.a.
Orizzontamenti	Piano terra	Solaio in c.a. prefabbricato	Piastrelle 1 cm Sottofondo cls 8 cm Solaio in laterocemento 16 cm Sottofondo cemento magro 10 cm
	Piano primo	Tegolo prefabbricato	C.a.
Copertura	Piana	Tegolo prefabbricato (spessore 30 cm)	Tegolo c.a. Pannello isolante in fibra di legno Guaina
Tamponamenti	Pannelli prefabbricati	Pannello doppio strato in cls con strato intermedio isolante	Strato in cls 9 cm Strato isolante in polistirolo 3 cm Strato in cls 9 cm
Superfici trasparenti	Finestre	Infissi metallici Doppio vetro	Vetro 0,6 cm Infissi 7 cm

STATO CONSERVATIVO DELLE COMPONENTI STRUTTURALI								
COMPONENTI STRUTTURALI	CAVILLATURE E FESSURAZ. SUPERFICIALI	LESIONI		DISTACCHI		CEDIMENTI	UMIDITÀ	INFILTRAZ. ACQUA METEORICA
		PASSANTI	NON PASSANTI	COPRI-FERRO	INTONACO			
Scheletro strutturale			●	●				
Pilastrature d'angolo	●			●				
Tamponamenti esterni	●		●				●	
Marcapiani e cornicioni				●				
Copertura								x

DOCUMENTAZIONE GRAFICA DI ARCHIVIO



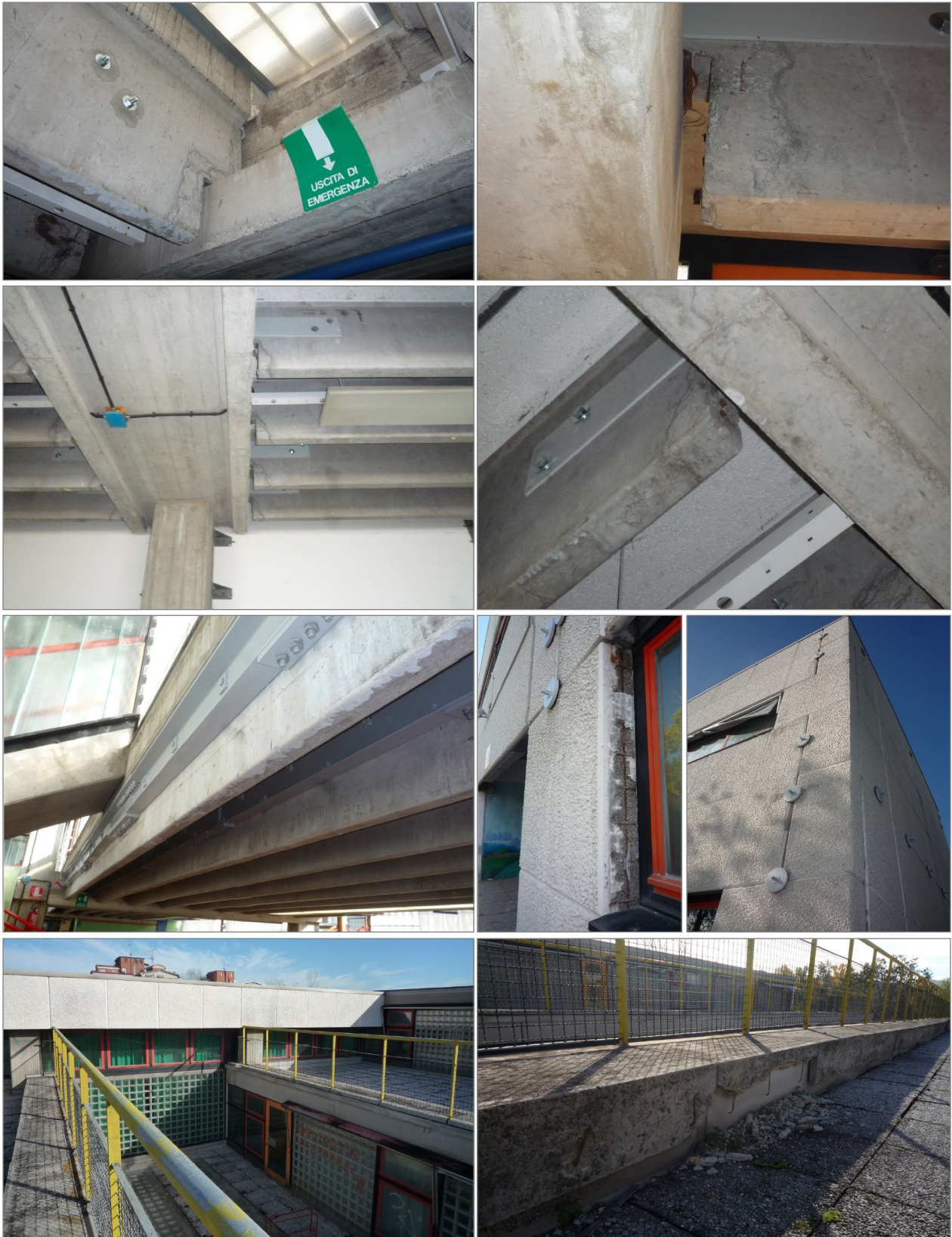
Pianta piano terra e piano primo



Prospetti



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DI RILIEVO (LUGLIO 2012)



ARCHIVI

Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna, via Zanardi 48, Bologna.

Archivio Storico di San Giorgio di Piano, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

EDILIZIA SCOLASTICA E PREFABBRICAZIONE

Abdullah M. M. A., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K. N., Ibrahim W. M. W., *Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement - A Review*, in "International Journal of Pure & Applied Sciences & Technology", September 2011, Vol. 6, Issue 1, p. 35.

Angeli F., *Edilizia scolastica. Programmazione Progettazione Realizzazione - Quaderno di orientamenti a cura dell'Assessorato alla pianificazione del territorio e parchi naturali*, Franco Angeli Editore, Milano 1980.

Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977.

Boarin P., *Edilizia scolastica. Riqualificazione energetica e ambientale. Metodologie operative, requisiti, strategie ed esempi per gli interventi sul patrimonio esistente*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2010.

Boarin P., *Riqualificazione energetica e ambientale dell'edilizia scolastica. Immagini, obiettivi, strategie, opportunità*, in Massarente A. (a c. di), "Quaderni Ferraresi. Annuari della Facoltà di Architettura di Ferrara 2007-2008", ALINEA Editrice, Firenze 2009, pp. 131.

Boldrini M., *Analisi e caratterizzazione tipologico-costruttiva del patrimonio edilizio scolastico bolognese. Il progetto di riqualificazione energetica della Scuola Media Dozza*, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, DAPT Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale – Università degli Studi di Bologna, A.A. 2011-2012.

CIE Centro Italiano dell'Edilizia (a c. di), *Problemi della industrializzazione dell'edilizia: Atti del Convegno Nazionale promosso dal CIE - Bologna 16-17 Ottobre 1965*, Giuffrè Editore, Firenze 1966.

Consorzio Provinciale delle Cooperative di Produzione Lavoro e Trasporti (Ufficio Progetti – Centro Studi), *Edilizia scolastica prefabbricata. Sistema S3*, Modena 1977.

Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a c. di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975.

Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a c. di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1975-1980*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio 1980, n.2, Bologna 1980. Frezza Bianco M. T., *Sistemi di industrializzazione e prefabbricazione per l'edilizia non residenziale*, in "Industria Italiana del Cemento", Luglio-Agosto 1977, AITEC Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, Roma 1977, pp. 579-592.

Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria Italiana del Cemento", Settembre 1980, AITEC Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, Roma 1980, pp. 693-758.

Gualdi F., Merlo R., *Bologna scuole. Progettare in Comune. Metaprogetto per la scuola media e due realizzazioni di scuole per l'infanzia*, in "Casabella", n.363, 1972 marzo, anno XXXVI, Editrice Casabella S.p.A., Milano 1972, pp. 40-47.

Gulli R., *L'edilizia scolastica prefabbricata in Italia. La sperimentazione degli anni '60*, in D'Agostino S. (a c. di), "Storia dell'Ingegneria. Atti del 2° Convegno Nazionale Napoli, 7-8-9 aprile 2008", Cuzzolin, Napoli 2008, Tomo primo, pp. 681-690.

Von Halasz R., *La prefabbricazione nell'edilizia industrializzata: costruire e costruzioni in prefabbricati di cemento armato*, ITEC, Roma 1969.

Leschiutta F. E., Scelfo G., *Industrializzazione e prefabbricazione per l'edilizia scolastica in Italia*, in "Industria Italiana del Cemento", Settembre 1977, AITEC Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, Roma 1977, pp. 757-763.

Leschiutta F. E., *Linee evolutive dell'edilizia scolastica: vicende, norme, tipi / 1949-1985*, Bulzoni, Roma 1985.

Lotus International, n. 10, ottobre 1975, Editoriale Lotus Srl, Milano 1975.

Masi E., *Storia e significati del nostro lavoro*, in "Parametro", n. 125, aprile 1984, pp.13-17.

Ministero della Pubblica Istruzione (a c. di), *La prefabbricazione nell'edilizia scolastica – Quaderni del Centro Studi per l'Edilizia Scolastica*, Nuova Serie - numero monografico n. 4-5, Firenze 1965.

Morra L., Pizzi E., *Ripensamenti sulla prefabbricazione leggera in edilizia scolastica: indagini conoscitive, proposte progettuali di recupero*, in Casciato M., Mornati S., Scavizzi C. P. (a c. di), "Il modo di costruire. 150 Anni di costruzione edile in Italia. Atti del II Seminario Internazionale", Roma 1992, pp. 473-484.

Olivieri E., *Analisi energetica del patrimonio scolastico bolognese. Il caso di studio della*

Scuola Materna Ciari, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, DAPT Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale – Università degli Studi di Bologna, A.A. 2009-2010.

Pichi D., *Prefabbricazione*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Edile-Architettura, Dipartimento di Architettura e Urbanistica - Università degli Studi di Roma, XX ciclo, 2007.

Quilici V., *Carattere regionale e ruolo nazionale delle cooperative emiliane / Regional Character and National Role of Housing Co-Operatives*, in “Lotus International”, n. 10, ottobre 1975, Editoriale Lotus Srl, Milano 1975.

Quilici V., Sichenze A., *Costruttori di Architetture. Bologna 1960-1980*, Officina Edizioni, Roma 1985.

Rosa G., Sajeve A., *Caratteri della tipologia edilizia e rapporto con la struttura urbana nelle proposte degli ultimi 40 anni in Italia*, in “Parametro”, n. 64, marzo-aprile 1978, pp. 64-77.

Salomoni C. (a c. di), *Lo spazio del cittadino/3 - A misura d'uomo. Ambiente, giovani, teatro, scuola in dodici progetti di servizi pubblici nel Comune di Bologna*, Marsilio Editori, Venezia 1985.

Spadolini P., *Prefabbricazione in cantiere: esperienze e studi sulla industrializzazione edilizia*, Editrice Fiorentina, Firenze 1968.

Sansoni Tutino N., *Scuola e Territorio - Problemi della nuova dimensione – Volume 4*, De Donato Editore – “Leonardo da Vinci”, Bari 1966.

Aa. Vv., *L'Architecture d'Aujourd'hui: cités nouvelles - centres urbains*, n. 101, avril-mai 1962, Paris Société Parisienne d'Imprimerie, Parigi 1962.

Aa. Vv., *Industrializzazione e prefabbricazione nell'edilizia scolastica*, AITEC Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, Roma 1966.

Aa. Vv., *Bologna/Cooperative*, in “Casabella”, n.368-369, 1972 agosto/settembre, anno XXXVI, Editrice Casabella S.p.A., Milano 1972, pp. 37-52.

Aa. Vv., *Neo-avant-garde and Postmodern Postwar Architecture in Britain and Beyond*, Yale Center for British Art, Londra 2010.

Vitale D., *Le cooperative emiliane / The Emilian Co-Operatives*, in “Lotus International”, n. 10, ottobre 1975, Editoriale Lotus Srl, Milano 1975.

INVOLUCRO EDILIZIO E RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA

Alagna A., *La riqualificazione tecnologica per la qualità ambientale: l'involucro edilizio*, Edizione DPCE, Università di Palermo, Palermo 2000.

Altomonte S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per una architettura sostenibile*, ALINEA Editrice, Città di Castello (Perugia) 2006.

Banham R., *Ambiente e tecnica nell'Architettura Moderna*, Laterza editore, Bari 1993.

Benedetti C., *Manuale di architettura bioclimatica*, Maggioli Editore, Milano 1994.

Boaga G. (a c. di), *L'involucro architettonico*, Masson editoriale ESA, Milano 1994.

Delera A., Rota R., *Riqualificazione energetica ed architettonica dei grands ensembles dégradati. L'esperienza francese*, in "Il Progetto Sostenibile", Manzano (Udine), Giugno 2011, Anno 9 - n°28, pp. 46-51.

Dogama D., D'Orazio M., *I sistemi vèture per il retrofitting energetico: comportamento termico e tenuta all'acqua*, in Greco A., Quagliarini E. (a c. di), "L'Involucro Edilizio. Una progettazione complessa", Volume 1, ALINEA Editrice, Città di Castello (Perugia) 2007, pp. 63-70.

Druot F., Lacaton A. & Vassal J.-P., *Plus*, Editorial Gustavo Gili, Barcellona 2007.

Ferrante A., Degli Esposti V., Dell'Acqua A. C., Mochi G. (a c. di), *Caratteri tipologici del costruito e caratteri di adeguamento tecnologico e ambientale*, ALINEA Editrice, Città della Pieve (Perugia) 2011.

Fiorito F., Fuzio G., *L'involucro edilizio. Evoluzione della progettazione e del processo realizzativi*, in "Involucro edilizio. Innovazione e sostenibilità - Atti del convegno", Bari 24 aprile 2004.

Fitch J. M., *La progettazione ambientale*, Franco Muzzio Editore, Padova 1991.

Franco G., *L'involucro edilizio. Guida alla progettazione e manutenzione delle chiusure verticali portate e portanti*, EPC Libri, Roma 2003.

Gaspari J., *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto del recupero*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2012.

Greco A., Quagliarini E. (a c. di), *L'involucro edilizio. Una progettazione complessa*, Ar.Tec - Associazione Scientifica per la Promozione dei Rapporti tra Architettura e Tecniche dell'Edilizia, ALINEA Editrice, Firenze 2007.

Hoyet N., *Matériaux et Architecture durable. Fabrication et transformations, propriétés*

physiques et architecturales, approche environnementale, Dunod, Parigi 2013.

Herzog T., Krippner R., Lang W., *Atlante delle facciate*, UTET Scienze Tecniche, Torino 2005.

Herzog T. (a c. di), *Solar Energy in Architecture and Urban Planning*, Prestel, Monaco 1996.

Olgyay V., *Progettare con il clima*, Franco Muzzio Editore, Padova 1990.

Romano R., *Smart Skin Envelope: Integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico*, Tesi di Dottorato, Firenze University Press, Firenze 2011.

Schittich C. (a c. di), *Building Skins. Concepts Layers Materials*, Birkhauser Edition Detail, Basilea 2006.

Terrin J.-J., *Les expertises relatives aux ambiances dans la conduite de projets*, in Evette T., Terrin J.-J., "Projets urbains - Expertises, concertation et conception", Actes des journées RA-MAU, 25-26 septembre 2003 organisées par l'UTC et le PUCA, Cahiers Ramau n° 4, Éditions de la Villette, Parigi 2006, pp. 23-56.

Tucci F., *Ecoefficienza dell'involucro architettonico. La pelle dell'edificio da barriera protettiva a complesso sistema-filtro selettivo e polivalente*, Dedalo, Roma 2012.

Tucci F., *Involucro ben temperato. Efficienza energetica ed ecologica in architettura attraverso la pelle degli edifici*, ALINEA Editrice, Firenze 2006.

Tucci F., *Involucri cromogenici termocromici*, in "Il Progetto Sostenibile", Manzano (Udine), Dicembre 2011, Anno 9 - n°30, pp. 20-25.

Tywoniak J., *Energy-related properties of building envelopes in environmental optimization*, in "Proceedings of Sustainable Building 2000", 22-25 October 2000, Maastricht, the Netherlands, Aeneas, Sittard 2000, pp. 180-182.

Aa. Vv., *Una fortezza passiva. Progetti_Veilige Veste a Leeuwarden (NL)*, KAW architecten en adviseurs, in "Azero", anno 2, n° 05, ottobre 2012, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2012, pp.34-39.

Wiggington M., Harris J., *Intelligent Skins*, Architectural Press, Londra 2002.

TECNOLOGIA DEI MATERIALI

Abdullah M. M. A., Hussin K., Bnhussain M., Ismail K. N., Ibrahim W. M. W., *Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement - A Review*, in “International Journal of Pure & Applied Sciences & Technology”, September 2011, Vol. 6, Issue 1, p. 35.

Ashby M., Johnson K., *Materials and Design. The Art and Science of Material Selection in Product Design*, Butterworth Heinemann, Oxford 2002.

Bassi L., Oleotto E. (a c. di), *Guida agli isolanti naturali. Prodotti, caratteristiche, tipologie d'impiego*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2011.

Bignozzi M.C., Manzi S., Lancellotti I., Kamseu E., Barbieri L., Leonelli C., *Mix-design and characterization of alkali activated materials based on metakaolin and ladle slag*. in “Applied Clay Science” n. 73, 2013, pp. 78-85.

Caprino G., Crivelli Visconti I., Langella A., *Materiali compositi. Tecnologie – Progettazione - Applicazioni*, Hoepli, Milano 2009.

Davidovits J., *Geopolymer: inorganic polymeric new materials*, in “Journal of Thermal analysis”, 1991, Vol. 37, pp. 1633-1656.

Davidovits J., *30 Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs*, Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne (Australia) 2002.

De Angelis E. (a c. di), *Materiali isolanti*, UTET Scienze tecniche, Milanofiori Assago (MI) 2009.

Duxon P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo Á., Van Deventer J. S. J., *Geopolymer technology: the current state of the art*, in “J Mater Sci”, 2007, pp. 2917-2933.

Fianchino C., Sciuto G. (a c. di), *Materiali e procedimenti innovativi per la sostenibilità in edilizia*, Primo seminario PRIN 2007. Materiali, procedimenti costruttivi e progetti innovativi per la compatibilità e la sostenibilità ambientale, ANABIBLO Edizioni, Roma 2009.

Garofolo I. (a c. di), *Sostenibilità nelle costruzioni. Lo stato della ricerca nell'Università italiana I*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2003.

Leonelli C., Kamseu E., Medri V., Fabbri S., *Materie prime di origine naturale nel processo di geopolimerizzazione*, in “Ceramica Informazione”, Luglio-Agosto 489, 2010, pp. 305-310.

Mazzoli C., Fusco O., Guardigli L., Gulli R., *Innovative materials and technologies for a new*

envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock, in “CESB13 - Central Europe towards Sustainable Building 2013, 26th-28th June 2013, Prague, Czech Republic, Proceedings”, Tiskarna PBtisk, Praga, giugno 2013, pp. 405-408.

Medri V., *Applicazione dei geopolimeri come materiali composite coibentanti e refrattari*, Ceramica Informazione, in “Speciale Cersaie”, 2009, pp. 83-86.

Medri V., *Geopolimeri: Ceramiche per uno sviluppo sostenibile*, in “L’Industria del Laterizio”, 115 gennaio-febbraio 2009, pp. 48-53.

Karlessi T., Santamouris M., Apostolakis K., Synnefa M., Livada I., *Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures*, in “Journal of Solar Energy 83”, 2009, pp. 538–551.

Karlessi T., Santamouris M., Synnefa M., Assimakopoulos D., Didaskalopoulos P., Apostolakis K., *Development and testing of PCM doped cool colored coatings to mitigate urban heat Island and cool buildings*, in “Journal of Building and Environment 46”, 2011, pp. 570–576.

Karlessi T., Santamouris M., *Improving the performance of thermochromic coatings with the use of UV and optical filters tested under accelerated aging conditions*, in “International Journal of Low-Carbon Technologies”, May 2013, pp. 1–17.

Kulcar R., Friskovec M., Hauptman N., Vesel A., Klanjsek Gunde M., *Colorimetric properties of reversible thermochromic printing inks*, in “Journal of Dyes and Pigments 86”, 2010, pp. 271-277.

Oti J. E., Kinuthis J. M., Bai J., *Design thermal values for unfired clay bricks*, in “Materials & Design”, Elsevier, Volume 31, Issue 1, January 2010, pp. 104-112.

Panias D., Vaou V., *Thermal insulating foamy geopolymers from perlite*, in “Minerals Engineering”, Elsevier, numero 23, 2010, pp. 1146-1151.

Phair J. W., *Green chemistry for sustainable cement production and use*, in “Green Chemistry”, 2006, pp. 763-780.

Della Porta F., Mazzelli M., *Appunti di teoria e pratica sui materiali compositi avanzati*, IBN Editore, Roma 2003.

Reyneri C. A., *Isolanti e guaine in bioedilizia*, EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia) 2010.

Santamouris M., Synnefa M., Karlessi T., *Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions*, in “Journal of Solar Energy 85”, 2011, pp. 3085–3102.

Synnefa A., Santamouris M., Apostolakis K., *On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment*, in “Journal of Solar Energy 81”, 2007, pp. 488–497.

Sasso U., *Dettagli per la bioclimatica*, ALINEA Editrice, Firenze 2006.

Sasso U., *Isolanti sì, isolanti no – secondo Bioarchitettura – Indicazioni operative su come, perché, quando e dove è indicato usare gli isolanti termici in edilizia*, ALINEA Editrice, Città di Castello (Perugia) 2003.

Aa. Vv., *Tecnologia dei materiali. Ceramiche, polimeri e compositi*, Città Studi Edizioni, Torino 2001.

Aa. Vv., *Il Nuovo Manuale Europeo di Bioarchitettura*, Gruppo Mancosu Editore, Roma 2007.

Vaou V., Papias D., *Thermal insulating foamy geopolymers from perlite*, in “Minerals Engineering”, Elsevier Science, Volume 23, Issue 14, November 2010, pp. 1146-1151.

MORFOLOGIA E MODELLAZIONE DIGITALE

Aste T., Weaire D., *The pursuit of perfect packing*, Institute of Physics Publishing (Bristol and Philadelphia), Londra 2000.

Banham R., *The architecture of the well-tempered environment: Second, Revised Edition*, Architectural Press, Londra 1984.

Bateson G., *Steps to an ecology of mind*, The University of Chicago Press, Chicago, 1974.

Brocato M., Deleporte W., Mondardini L., Tanguy J.-E., *A proposal for a New Type of Prefabricated Stone Wall*, in "International Journal of Space Structures", Volume 29 - Number 2 - 2014, Multi-Science Publishing CO. LTD, Brentwood (UK) 2014, pp. 97-112.

Burry J., Burry M., *The new mathematics of Architecture*, Thames & Hudson, New York 2010.

Conway J. H., Sloane N. J. A., *Sphere packing, Lattices and groups*, Springer-Verlag, New York 1993.

Danxer L., *Three-dimensional analogs of the Planar Penrose Tilings and Quasicrystals*, in "Discrete Mathematics", vol. 76, n. 1, Elsevier 1989, pp. 1-7.

Dyskin A. V., Estrin Y., Kanel-Belov A. J., Pasternak E., *A new concept in design of materials and structures: assemblies of interlocked tetrahedron-shaped elements*, in "Scripta Materialia", Vol. 44, No. 12, Pergamon, 2001, pp. 2689-2694.

Dyskin A. V., Estrin Y., Kanel-Belov A. J., Pasternak E., *Topological interlocking of platonic solids: a way to new materials and structures*, in "Philosophical Magazine Letters", Vol. 83, No. 3, Taylor & Francis, 2002 pp. 197-203.

Dyskin A. V., Estrin Y., Kanel-Belov A. J., Pasternak E., *A new principle in design of composite materials: reinforcement by interlocked elements*, in "Composites Science and Technology", No. 63, Elsevier, 2002, pp. 483-491.

Erioli A., *Il computer come design medium in architettura*, in "INARCOS", n. 734, Anno LXVIII, 4_2013, pp. 7-13.

Estrin Y., Dyskin A. V., Pasternak E., *Topological interlocking as a material design concept*, in "Materials Science and Engineering C", n. 31, Elsevier, 2010, pp. 1189-1194.

Emmerich D. G., *Exercices de géométrie constructive: Travaux d'étudiants*, Éditions de La Villette, Parigi 1985.

Fernandez J., *Material Architecture. Emergent materials for innovative buildings and ecological construction*, Elsevier, Oxford 2006.

Forty A., *Words and Buildings. A vocabulary of Modern Architecture*, Thames & Hudson, Londra 2004.

Frei O., *L'architettura della natura*, Il Saggiatore, Milano 1984.

Frescaroli L., Leoni S., *Verso un'architettura parametrica. La progettazione di forme complesse: la mostra e il corso di alta formazione al Politecnico di Milano*, in "Architetti", numero 8-9 Agosto-Settembre 2010, p. 19.

Girelli V. A., *Tecniche digitali per il rilievo, la modellazione tridimensionale e la rappresentazione nel campo dei beni culturali*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Geodetiche e Topografiche, Facoltà di Ingegneria - Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, 2007.

Glickman M., *The G-Block System of vertically interlocking paving*, in "2nd International Conference on Concrete Block Paving Proceedings", Delft (Netherlands), 10-12 April 1984, pp. 345-348.

Goodman R. E., Shi G.-H., *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, Londra, 1985.

Grasselli L., Costa A. F., *Le forme della simmetria: dai mosaici dell'Alhambra ai mondi di Escher*, in Bussagli M., Giudiceandrea F., Grasselli L. (a c. di), "L'enigma di Escher. Paradossi grafici tra arte e geometria", Skira, Milano, 2013, pp. 33-53.

Hensel M., Menges A., Weinstock M., *Emergent Technologies and Design. Toward a biological paradigm for architecture*, Routledge, Londra 2010.

Khandelwal S., Siegmund T., Cipra R. J., Bolton J. S., *Transverse loading of cellular topologically interlocked materials*, in "International Journal of Solids and Structures", n. 49, Elsevier, 2012, pp. 2394-2403.

Khor H. C., *Mechanical and structural properties of interlocking assemblies*, Master Degree at School of Civil and Resource Engineering – University of Western Australia, October 2008.

Khor H. C., Dyskin A. V., Estrin Y., Pasternak E., *Mechanisms of fracturing in structures built from topologically interlocked blocks*, in "Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04) Proceedings", Brisbane (Australia), 26-29 September 2004, Editors A. Atrens, J. N. Boland, R. Clegg, J. R. Griffiths, pp. 189-194.

Kwinter S., *Un discorso sul metodo*, Birkhauser, Basilea 2006.

March L., *Architecture and Mathematics since 1960*, in Williams K., Rodrigues J. F. (a c. di), "Nexus IV: Architecture and Mathematics", Kim Williams Books, Torino 2002, pp. 7-33.

Pearce P., *Structure in nature is a strategy for Design*, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1990.

Remondino F., El-Hakim S., *Image-based 3D modelling: a review*, in "The Photogrammetric Record", 21 (115), 2006, pp. 269-291.

Schaare S., Dyskin A. V., Estrin Y., Arndt S., Pasternak E., Kanel-Belov A. J., *Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements*, in "International Journal of Solids and Structures", n. 46, Elsevier, 2008, pp. 1228-1238.

Siegmund T., Khandelwal S., Cipra R., Bolton S. J., *Scaling of the elastic behavior of 2D topologically interlocked materials under transverse loading*, in "Journal of Applied Mechanics", ASME, 2013.

RIFERIMENTI NORMATIVI (NAZIONALI ED EUROPEI)

EDILIZIA SCOLASTICA: COSTRUZIONE E SICUREZZA SISMICA

D.M. 4 maggio 1925 - *Approvazione delle norme per la compilazione dei progetti di edifici scolastico scuole secondarie.*

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 13 novembre 1941, n. 45 - *Direttive per la compilazione dei progetti edilizi delle scuole industriali medie e superiori e tecniche.*

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 2 aprile 1955, n. 4246 - *Progetti per la costruzione di edifici scolastici.*

D.P.R. 1 dicembre 1956, n. 1988 - *Approvazione di nuove norme per la compilazione dei progetti di edifici ad uso delle scuole elementari e materne.*

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 10/871957, n. 2308 - *Istruzioni tecniche sull'applicazione delle "nuove norme per la compilazione dei progetti di edifici ad uso delle scuole elementari e materne" di cui alla Legge 1988/56.*

Legge 15 febbraio 1961, n. 53 - *Istituzione di nuovi corsi di scuola popolare in aggiunta a quelli già istituiti nell'anno scolastico 1960-61 e provvidenze per i centri di lettura e l'edilizia scolastica prefabbricata.*

Legge 26 gennaio 1962, n. 17 - *Utilizzazione di fondi sinora accantonati per il finanziamento del piano per lo sviluppo della scuola.*

Legge 26 gennaio 1963, n. 47 - *Norme relative all'edilizia scolastica prefabbricata.*

Circolare 29 settembre 1964, n. 3930 - *Rapporto tra amministrazioni statali e comunali. Dimensionamento delle attrezzature scolastiche nei piani di zona. Rilevamento dei dati riguardanti i piani di zona. Rilevamento dei dati riguardanti gli altri piani urbanistici.*

Legge 18 dicembre 1964, n. 1358 - *Provvidenze per l'edilizia scolastica.*

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 26 marzo 1965, n. 3625 - *Norme per la progettazione di edifici destinati alle scuole medie.*

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 6 maggio 1965, n. 5122 - *Edifici scolastici ad elementi modulari prefabbricati.*

Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 10 febbraio 1966, n. 2345 - *Edilizia scolastica prefabbricata.*

Legge 28 luglio 1967, n. 641 - *Nuove norme per l'edilizia scolastica e universitaria.*

D.lgs. 24 ottobre 1969, n. 701 - *Norme integrative e modificative della legge 641/67 sull'edilizia scolastica e universitaria.*

Legge 22/12/1969 n. 952 - *Trasformazione in legge del D.lgs. 701/69.*

D.M. 21 marzo 1970 - *Norme tecniche relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici minimi di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di edilizia scolastica.*

Legge 5 agosto 1975, n. 412 - *Norme sull'edilizia scolastica e Piano Finanziario di Intervento.*

D.M. 18 dicembre 1975 - *Norme Tecniche aggiornate relative all'edilizia scolastica, ivi compresi gli indici di funzionalità didattica, edilizia ed urbanistica, da osservarsi nella esecuzione di opere di edilizia scolastica.*

D.M. 13 settembre 1977, n. 338 - *Modificazioni alle norme tecniche relative alla costruzione degli edifici scolastici.*

D.lgs 5 settembre 1988, n. 390 - *Disposizioni urgenti per l'edilizia scolastica.*

Legge 9 gennaio 1989, n.13 - *Disposizioni per favorire il superamento e l'eliminazione delle barriere architettoniche negli edifici privati.*

Legge 5 marzo 1990, n.46 - *Norme per la sicurezza degli impianti.*

D.P.R. 6 dicembre 1991, n.447 - *Regolamento di attuazione della L. 5 marzo 1990, n. 46, in materia di sicurezza degli impianti.*

Legge 5 febbraio 1992, n.104 - *Abbattimento delle barriere architettoniche. Legge-quadro per l'assistenza, l'integrazione sociale e i diritti delle persone handicappate.*

D.M. 26 agosto 1992, n.23 - *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica.*

Legge 11 gennaio 1996, n.23 - *Norme per l'edilizia scolastica.*

D. M. 18 aprile 1996 - *Istituzione dell'Osservatorio per l'edilizia scolastica.*

Lettera circolare del Ministero Interno del 17 maggio 1996, n.P954-4122, Sott. 32 - *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica - Chiarimenti sulla larghezza delle porte delle aule didattiche ed esercitazioni.*

D.P.R. 24 luglio 1996, n.503 - *Abbattimento delle barriere architettoniche. Regolamento recante norme per l'eliminazione delle barriere architettoniche negli edifici, spazi e servizi pubblici*

Lettera circolare del Ministero dell'interno (Dir. Gen. Prot. Civ. e Servizi Antincendi) del 30

ottobre 1996, n. P2244/4122, D.M. 26-8-1992 - *Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica*". - *Chiarimenti applicativi e deroghe in via generale ai punti 5.0 e 5.2.*

Legge 2 ottobre 1997, n. 340 - *Norme in materia di organizzazione scolastica e di edilizia scolastica.*

Legge 16 giugno 1998, n. 191 - *Modifiche ed integrazioni alle leggi 15 marzo 1997, n. 59, e 15 maggio 1997, n. 127, nonché norme in materia di formazione del personale dipendente e di lavoro a distanza nelle pubbliche amministrazioni. Disposizioni in materia di edilizia scolastica.*

D.P.R. 18 giugno 1998, n. 233 - *Regolamento recante norme per il dimensionamento ottimale delle istituzioni scolastiche e per la determinazione degli organici funzionali dei singoli istituti, a norma dell'articolo 21 della legge 15 marzo 1997, n. 59.*

D.P.R. dell'8 marzo 1999, n.275 - *Regolamento recante norme in materia di Autonomia delle istituzioni scolastiche ai sensi dell'art.21, della legge 15 marzo 1999, n.59.*

Legge 3 agosto 1999, n. 265 (art. 15), in applicazione del D.L. 626/94 - *Termini per gli interventi di carattere strutturale finalizzati all'adeguamento e messa a norma degli edifici scolastici all'interno delle "Disposizioni in materia di autonomia e ordinamento degli enti locali, nonché modifiche alla legge 8/6790 n. 142".*

D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 554 - *Regolamento di attuazione della Legge 11 febbraio 1994, n. 109 - Legge quadro in materia di lavori pubblici, e successive modificazioni.*

Legge 10 febbraio 2000, n. 30 - *Legge-quadro in materia di riordino dei cicli dell'istruzione*

D.P.R. 6 giugno 2001, n.380 - *Testo Unico delle disposizioni legislative e regolamentari in materia edilizia.*

Deliberazione 29 novembre 2002, n. 101 - *Edilizia scolastica: integrazioni del programma approvato con delibera n. 89 del 26/6/1996.*

Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003, n. 3274 - *Normativa antisismica - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.*

Legge 28 marzo 2003, n. 53 - *Delega al Governo per la definizione delle norme generali sull'istruzione e dei livelli essenziali delle prestazioni in materia di istruzione e formazione personale.*

D.lgs. 19 febbraio 2004, n. 59 - *Definizione delle norme generali relative alla scuola dell'infanzia e al primo ciclo dell'istruzione, a norma dell'articolo 1 della Legge 28 marzo 2003, n. 53.*

D.M. (Infrastrutture e trasporti) 22 giugno 2004, n.898/IV - *Procedura e schemi-tipo per la redazione e la pubblicazione del programma triennale, dei suoi aggiornamenti annuali e dell'elenco annuale dei lavori pubblici, ai sensi dell'art. 14, c. 11, della Legge 11 febbraio 1994, n.109, e successive modificazioni e integrazioni.*

Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14 gennaio 2008), luglio 2006.

D.M. 14 gennaio 2008 - *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.*

Lettera circolare del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti del 2 febbraio 2009, n. 617 - *Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.*

Linee guida per il rilevamento della vulnerabilità degli elementi non strutturali nelle scuole (Intesa Rep. 7/CU del 28/1/2009).

Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali, in collaborazione con Federazione Regionale Ordini Ingegneri dell'Emilia Romagna, *Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici*, (BOZZA 19 giugno 2012, v. 1.0).

Linee Guida M.I.U.R., Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale, 11 giugno 2013.

EFFICIENZA ENERGETICA

Legge 9 gennaio 1991, n.10 - *Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia.*

D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412 - *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, c. 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10 (modificato dal D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551).*

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2002/91/CE del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.

UNI EN 13495:2003 - *Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze allo strappo dei sistemi di isolamento per l'esterno (cappotti).*

UNI EN 13497:2003 - *Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze all'impatto dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti).*

UNI EN 13498:2003 - *Isolanti termici in edilizia - Determinazione delle resistenze alla penetrazione dei sistemi di isolamento termico per l'esterno (cappotti).*

UNI EN 13830:2005 - *Facciate continue. Norma di prodotto.*

D.lgs. 19 agosto 2005, n.192 - *Ripubblicazione del testo del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante: "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.", corredato delle relative note.*

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2006/32/CE del 5 aprile 2006 concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio.

D.lgs. 29 dicembre 2006, n.311 - *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.*

D.lgs. 30 maggio 2008, n. 115 - *Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE.*

D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59 - *Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/*

CE sul rendimento energetico in edilizia - Metodologie per il calcolo della prestazione energetica di edifici e impianti.

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2009/28/CE del 23 aprile 2009 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE).

D.M. (Sviluppo economico) 26/06/2009, n. 158 - *Ministero dello Sviluppo economico - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.*

Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio 2010/31/CE del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica dell'edilizia.

D.lgs. 3 marzo 2011, n.28 - *Attuazione della Direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE).*

Ordinanza del Presidente della Regione Emilia-Romagna 16 giugno 2012, n.2 - *Coordinamento degli interventi di ripristino urgente degli immobili adibiti ad uso scolastico ed ai servizi per la prima infanzia.*

Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio 2012/27/UE del 25 ottobre 2012 sull'efficienza energetica (che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE).

D.P.R. 16 aprile 2013, n.75 - *Regolamento recante disciplina dei criteri di accreditamento per assicurare la qualificazione e l'indipendenza degli esperti e degli organismi a cui affidare la certificazione energetica degli edifici, a norma dell'art. 4, c. 1, lettera c), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192.*

D.lgs. del 4 giugno 2013, n.63 - *Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale (abrogazione del D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59).*

RIFERIMENTI FIGURE

INTRODUZIONE / INTRODUCTION

[Fig. 1] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in “Industria Italiana del Cemento”, Settembre 1980, AITEC Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, Roma 1980, pp. 693-758.

[Fig. 2] Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a cura di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1975-1980*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio 1980, n.2, Bologna 1980.

[Fig. 3] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

PARTE I - MATERIALI E TECNICHE / PARTIE I - MATÉRIAUX ET TECHNIQUES

I. STATO DELL'ARTE / ÉTAT DE L'ART

[Fig. 1] Materiale fotografico prodotto da (da sinistra a destra): Rob Schell; Will Stanley; Shlomit Ouziel.

[Fig. 2] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra a destra):
<http://www.skyscrapercity.com> ;
<http://inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe/>.

[Fig. 3] Materiale fotografico prodotto da (da sinistra a destra): Jacobo Gordon, NOAA Photo Library.

[Fig. 4] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra a destra):
<http://blog.colourstudio.com> ;
<http://www.mortarsprayer.com>.

[Fig. 5] Materiale fotografico (da sinistra a destra):
 prodotto da David Iliff;
 proveniente dal sito web <http://www.crestock.com/image>.

[Fig. 6] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra a destra):
<http://structurae.net> ;
<http://www.yalescientific.org/>.

[Fig. 7-14] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

II. PROCESSI E METODI PER LA RIQUALIFICAZIONE DELL'INVOLUCRO / PROCESSUS ET MÉTHODES POUR LA RÉNOVATION DE L'ENVELOPPE

[Fig. 1] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 2] Dana J. D., *On the Drawing of Figures of Crystals*, in Silliman B. (a c. di), "The American Journal of Science and Arts", Vol. XXXIII, January 1838, p. 43.

III. SPERIMENTAZIONE COSTRUTTIVA / EXPÉRIMENTATION CONSTRUCTIVE

[Fig. 1] Materiale fotografico proveniente dal sito: http://cajunlady77.blogspot.it/2011_03_01_archive.html.

[Fig. 2, 3] Materiale fotografico prodotto da Fusco O. nell'ambito delle ricerche svolte presso il DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna.

[Fig. 4] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 5] Materiale fotografico proveniente dal sito: http://www.instoria.it/home/arte_more-sca_escher.htm.

[Fig. 6] Materiale fotografico proveniente dal sito: <http://www.greatbuildings.com/cgi->.

[Fig. 7] Materiale fotografico proveniente dal sito: <http://www.art-4-home.com/mc-escher/two-birds-p22643.html>.

[Fig. 8] Materiale fotografico proveniente dal sito: <http://www.wikiart.org/en/m-c-escher/metamorphosis-iii-1968-1#supersized-artistPaintings-204604>.

[Fig. 9, 10] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 11] Pearce P., *Structure in nature is a strategy for Design*, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1990.

[Fig. 12] Pearce P., *Structure in nature is a strategy for Design*, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts) 1990.

[Fig. 13] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra a destra):
<http://www.sldinfo.com/pacific-strategy-xvi-weaponizing-the-honeycomb/> ;
<http://www.bwmag.in/geometry-in-the-wild>.

[Fig. 14] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra a destra):
http://www.naturamediterraneo.com/forum/topic.asp?TOPIC_ID=202577 ;
<http://www.xtec.cat/~aardერიu/WEB%20ELS%20PEIXOS/WEB%20PEIXOS/COM%20>

SON%20ELS%20PEIXOS.html ;

<http://it.northrup.org/photos/armadillo/>.

[Fig. 15] Abeille J., *Mémoire concernant la voûte plate inventée par M. Abeille, présenté en 1699*, in Académie royale des Sciences, “Machines et inventions approuvées par l’Académie royale des Sciences”, Tome 1, 1735, pp. 159-161.

[Fig. 16, 17] Gargiani R. (sotto la direzione di), *L’architrave, le plancher, la plate-forme. Nouvelle histoire de la construction*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Losanna 2012.

[Fig. 18] Rabasa Diaz E., *La bóveda plana de Abeille*, in “Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción”, La Coruña, 22-24 octubre 1998.

[Fig. 19] Glickman M., *The G-Block System of vertically interlocking paving*, in “2nd International Conference on Concrete Block Paving Proceedings”, Delft (Netherlands), 10-12 April 1984, pp. 345-348.

[Fig. 20] Estrin Y., Dyskin A. V., Pasternak E., *Topological interlocking as a material design concept*, in “Materials Science and Engineering C”, n. 31, Elsevier, 2010, pp. 1189-1194.

[Fig. 21] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall’autore.

[Fig. 22] Dyskin A. V., Estrin Y., Kanel-Belov A. J., Pasternak E., *Topological interlocking of platonic solids: a way to new materials and structures*, in “Philosophical Magazine Letters”, Vol. 83, No. 3, Taylor & Francis, 2002 pp. 197-203.

[Fig. 23] Estrin Y., Dyskin A. V., Pasternak E., *Topological interlocking as a material design concept*, in “Materials Science and Engineering C”, n. 31, Elsevier, 2010, pp. 1189-1194.

[Fig. 24-30] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall’autore.

[Fig. 31] (A sinistra) Schaare S., Dyskin A. V., Estrin Y., Arndt S., Pasternak E., Kanel-Belov A. J., *Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements*, in “International Journal of Solids and Structures”, n. 46, Elsevier, 2008, p. 1230.

(A destra, sopra) Khor H. C., *Mechanical and structural properties of interlocking assemblies*, Master Degree at School of Civil and Resource Engineering - University of Western Australia, October 2008, p.35.

(A destra, sotto) Schaare S., Dyskin A. V., Estrin Y., Arndt S., Pasternak E., Kanel-Belov A. J., *Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements*, in “International Journal of Solids and Structures”, n. 46, Elsevier, 2008, pp. 1228-1235.

[Fig. 32] Schaare S., Dyskin A. V., Estrin Y., Arndt S., Pasternak E., Kanel-Belov A. J., *Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements*, in “International Journal of Solids and Structures”, n. 46, Elsevier, 2008, pp. 1228-1235.

[Fig. 33] Khor H. C., *Mechanical and structural properties of interlocking assemblies*, Master Degree at School of Civil and Resource Engineering - University of Western Australia, October 2008, p.36.

[Fig. 34] (Sopra) Khor H. C., Dyskin A. V., Estrin Y., Pasternak E., *Mechanisms of fracturing in structures built from topologically interlocked blocks*, in “Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04) Proceedings”, Brisbane (Australia), 26-29 September 2004, Editors A. Atrens, J. N. Boland, R. Clegg, J. R. Griffiths, pp. 189-194.

(Sotto) Aa., Vv., *Linee guida per la progettazione delle piastre in c.a.*, Pàtron Editore, Bologna 2007.

[Fig. 35] Khor H. C., Dyskin A. V., Estrin Y., Pasternak E., *Mechanisms of fracturing in structures built from topologically interlocked blocks*, in “Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04) Proceedings”, Brisbane (Australia), 26-29 September 2004, Editors A. Atrens, J. N. Boland, R. Clegg, J. R. Griffiths, pp. 189-194.

[Fig. 36] Schaare S., Dyskin A. V., Estrin Y., Arndt S., Pasternak E., Kanel-Belov A. J., *Point loading of assemblies of interlocked cube-shaped elements*, in “International Journal of Solids and Structures”, n. 46, Elsevier, 2008, pp. 1233.

[Fig. 37, 40, 47-49, 51-70] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore con il software *Cast3M 2000*.

[Fig. 41-46, 50, 74, 76, 77] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 42] Zavanella V., *Strutture, calcolo, progetto - Tecnica delle costruzioni*, Volume 2, Zanichelli, Bologna 2002, p. 44.

[Fig. 38, 39, 71-73, 75, 78-85] Materiale fotografico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 86] Materiale fotografico proveniente dal sito web:

<http://europaconcorsi.com/projects/198399-Herzog-de-Meuron-Museum-der-Kulturen/images/>.

[Fig. 87] Materiale fotografico proveniente dal sito web:

<http://europaconcorsi.com/projects/219282-FR-EE-Fernando-Romero-Enterprise-Museo-Soumaya/images/>.

[Fig. 88] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra):

<http://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/in-europa/mercato-santa-caterina-miralles-tagliabue-barcellona-482.html> ;

<http://www.webwebweb.it/images/barcellona/image7.html>.

[Fig. 89] Materiale fotografico proveniente dai siti web (da sinistra):

<http://www.architecture.com/RIBA/Awards/RIBAIInternationalPrize/2005/Spanish-Pavilion.aspx> ;

<http://www.metalocus.es/content/en/blog/toni-cumella-shaping-ideas-modelando-ideas>.

[Fig. 90] Materiale fotografico proveniente dal sito web:

<http://europaconcorsi.com/projects/242142-Park-Associati-The-Cube-London-and-Stockholm>.

[Fig. 91] Materiale fotografico proveniente dal sito web:

<http://www.dezeen.com/2011/08/25/harpa-concert-and-conference-centre-reykjavik-by-henning-larsen-architects/>.

[Fig. 92] Materiale fotografico proveniente dal sito web:

<http://www.archdaily.com/275460/kroed-chun-qing-li-of-pavilion-architecture/>.

[Fig. 93] Materiale fotografico proveniente dal sito web:

<http://www.dezeen.com/2009/05/20/3d2real-by-ilek-students/MOSTRA ILEK students Stoccarda>.

[Fig. 94-102] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 103] Cortexa - Consorzio per la cultura del sistema a cappotto, *Manuale per l'applicazione del Sistema a Cappotto*, Cortexa, Calenzano (Firenze), Settembre 2012.

[Fig. 104] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 105] Immagine tratta dalla scheda tecnica del sistema ancorante "Fisher FAZ II 10/10".

[Fig. 106, 107] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore, svolto con l'applicazione messo a disposizione dal sito *MyGreenBuildings.org*, secondo la norma UNI EN ISO 13786.

[Fig. 108] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 109] Materiale fotografico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 110, 111] Mazzoli C., Fusco O., Guardigli L., Gulli R., *Innovative materials and technologies for a new envelope system in the sustainable refurbishment of existing building stock*, in "CESB13 - Central Europe towards Sustainable Building 2013, 26th-28th June 2013, Prague, Czech Republic, Proceedings", Tiskarna PBTisk, Praga, giugno 2013, pp. 405-408.

[Fig. 112] Materiale fotografico prodotto da Fusco O., nell'ambito delle ricerche svolte presso il DICAM - Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna. pp. 405-408.

PARTE II - ANALISI E PROGETTO / PARTIE II - ANALYSE ET PROJET

IV. UN CASO DI STUDIO. IL PATRIMONIO EDILIZIO SCOLASTICO DI BOLOGNA / UN ÉTUDE DE CAS. LE PATRIMOINE BÂTI SCOLAIRE DE BOLOGNE

[Fig. 1] Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a c. di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975.

[Fig. 2] Sansoni Tutino N., *Scuola e Territorio - Problemi della nuova dimensione – Volume 4*, De Donato Editore – “Leonardo da Vinci”, Bari 1966, p. 151.

[Fig. 3] Gualdi F., Merlo R., *Bologna scuole. Progettare in Comune. Metaprogetto per la scuola media e due realizzazioni di scuole per l'infanzia*, in “Casabella”, n.363, 1972 marzo, anno XXXVI, Editrice Casabella S.p.A., Milano 1972, p. 41.

[Fig. 4] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in “Industria Italiana del Cemento”, Settembre 1980, AITEC Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento, Roma 1980, pp. 693-758.

[Fig. 5] Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a c. di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975.

[Fig. 6] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 7] Materiale fotografico estratto da Google Earth.

[Fig. 8] Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a c. di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1975-1980*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio 1980, n.2, Bologna 1980.

[Fig. 9] Direzione dei servizi di informazione e relazioni pubbliche del Comune di Bologna (a c. di), *Il Comune di Bologna per la scuola 1970-1975*, Bologna Documenti del Comune - Febbraio/Marzo 1975, Bologna 1975.

[Fig. 10] Materiale fotografico estratto da Google Earth.

[Fig. 11-14] Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, “L'Industria Italiana del Cemento”, Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, (da sinistra a destra) pp. 235, 174, 149, 206.

[Fig. 15] Di Varmo F., *Analisi dei procedimenti costruttivi impiegati e delle realizzazioni*,

contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, p. 345.

[Fig. 16-21] Cislighi F., *Lo sviluppo tipologico e tecnologico degli elementi componenti le strutture*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, pp. 104, 107, 109.

[Fig. 22] Scelfo G., *Realizzazione tra sistemi costruttivi impiegati e sviluppi tipologico-architettonici delle realizzazioni*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, p. 390.

[Fig. 23] Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, (da sinistra a destra) pp. 93, 408.

[Fig. 24] Scelfo G., *Realizzazione tra sistemi costruttivi impiegati e sviluppi tipologico-architettonici delle realizzazioni*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, p. 378.

[Fig. 25-27] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 694-695.

[Fig. 28-31] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 697, 699, 702.

[Fig. 32-34] Leschiutta F., *La problematica e la normativa*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, pp. 374, 377, 380.

[Fig. 35, 36] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, p. 716.

[Fig. 37, 38, 40] Scelfo G., *Relazione tra sistemi impiegati e sviluppi tipologici-architettonici delle realizzazioni*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento",

Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, pp. 342, 348, 346.

[Fig. 39, 42, 43, 46] Scelfo G., *Relazione tra sistemi impiegati e sviluppi tipologici-architettonici delle realizzazioni*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, pp. 386, 397, 403, 398.

[Fig. 41, 44, 45] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 704-706.

[Fig. 47-49] Scelfo G., *Relazione tra sistemi impiegati e sviluppi tipologici-architettonici delle realizzazioni*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, pp. 410, 407, 411.

[Fig. 50-53] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 724, 726, 728, 729.

[Fig. 54] Scelfo G., *Relazione tra sistemi impiegati e sviluppi tipologici-architettonici delle realizzazioni*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, p. 416.

[Fig. 55-58] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 739, 734, 740, 742.

[Fig. 59, 60, 63] Cislighi F., *Lo sviluppo tipologico e tecnologico degli elementi componenti le strutture*, contributo in Associazione Italiana Tecnico Economica del Cemento (a c. di), *Industrializzazione dell'edilizia e prefabbricazione*, in AITEC, "L'Industria Italiana del Cemento", Publisher, Roma giugno, luglio/agosto 1977, pp. 78, 75.

[Fig. 61, 62] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 751, 752.

[Fig. 64-69] Consorzio Provinciale delle Cooperative di Produzione Lavoro e Trasporti (Ufficio Progetti – Centro Studi), *Edilizia scolastica prefabbricata. Sistema S3*, Modena 1977.

[Fig. 70-73] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, pp. 710-712.

[Fig. 74] Goffi L., *Industrializzazione e prefabbricazione edilizia*, in "Industria italiana del Cemento", settembre 1980, p. 718.

[Fig. 75] *Tavola estratta dal progetto esecutivo della Scuola Media dell'I.C. "Farini", Archivio Storico di San Giorgio di Piano, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).*

[Fig. 76, 77] Materiale fotografico prodotto dall'autore.

[Fig. 78] Classificazione sismica dell'Emilia-Romagna, *Ordinanza del PCM n. 3274/2003 (Allegato 1, punto 3 "prima applicazione")*.

[Fig. 79-95] Materiale fotografico e grafico di proprietà di Schiavina Srl (Impresa Schiavina Srl, *Strutture in c.a. e miste. Illustrazioni di interventi effettuati*, Lezione del 2 ottobre 2012, Corso formativo di 36 ore "Dall'analisi della vulnerabilità sismica alla definizione e attuazione di un progetto statico-sismico degli edifici in muratura, in c.a., prefabbricati e monumentali", organizzato da IIPLE Bologna - Facoltà di Ingegneria UNIBO, seguito dall'autore).

[Fig. 96] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 97-101] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore con il software *DesignBuilder*, in collaborazione con Petroncini Laura (Petroncini L., *Analisi e progetto di una soluzione di involucro applicata ad un caso di studio: la Scuola Media "G. Dozza" a Bologna*, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Relatore: Prof. Gulli R., Correlatori: Ing. Bartolini N., Ing. Mazzoli C., DA Dipartimento di Architettura – Università degli Studi di Bologna, A.A. 2013-2014.).

[Fig. 102-110] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore con il software *Ecotect analysis*, in collaborazione con Petroncini Laura (Petroncini L., *Analisi e progetto di una soluzione di involucro applicata ad un caso di studio: la Scuola Media "G. Dozza" a Bologna*, Tesi di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Relatore: Prof. Gulli R., Correlatori: Ing. Bartolini N., Ing. Mazzoli C., DA Dipartimento di Architettura – Università degli Studi di Bologna, A.A. 2013-2014.).

V. IL PROGETTO DI INTERVENTO DELLA SCUOLA MEDIA "DOZZA" / LE PROJET D'INTERVENTION DE L'ÉCOLE SECONDAIRE "DOZZA"

[Fig. 1] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

[Fig. 2, 3] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore con il software *DesignBuilder*.

[Fig. 4, 5] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore, svolto con l'applicazione *Re-Green-ver.1.0.6* messo a disposizione dal sito *MyGreenBuildings.org*.

[Tavole di progetto] Materiale grafico prodotto ed elaborato dall'autore.

APPENDICE - SCHEDE ANAGRAFICHE E DI RILIEVO / ANNEXE - FICHES ANAGRAPHIQUES ET DE RELEVÉ

1. Scuola “Volta”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

2. Scuola “Testoni-Fioravanti”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

3. Scuola “Panzini”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

4. Scuola “Zappa”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

5. Scuola “Salvo D'Acquisto”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

6. Scuola “De Andrè - Ex Alighieri”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

7. Scuola “Gandino”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bo-

logna).

8. Scuola “Dozza”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

9. Scuola “Zanotti”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

10. Scuola “Besta”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

11. Scuola “Saffi”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

12. Scuola “Guido Reni”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

13. Scuola “Jacopo della Quercia”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

14. Scuola “Imerio”:

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*,

Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

15. Scuola "Rolandino de' Passeggeri":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

16. Scuola "Pepoli":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

17. Scuola "Leonardo Da Vinci":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

18. Scuola "Guinizelli":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

19. Scuola "Carracci":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

20. Scuola "Farini":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dall'*Archivio Storico di San Giorgio di Piano*, Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna, via Marconi 3-5-7, San Giorgio di Piano (Bologna).

21. Scuola "Guercino":

Documentazione fotografica di rilievo: prodotta ed elaborata dall'autore;

Documentazione grafica di archivio: proveniente dal *Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna*, via Zanardi 48, Bologna.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno reso possibile la realizzazione di questo progetto di ricerca, contribuendo con le proprie competenze allo svolgimento del mio lavoro.

In particolare, ringrazio il Prof. Gulli per avermi sostenuto durante l'intero percorso, dimostrando sempre grande professionalità e partecipando con grande attenzione e coinvolgimento ad ogni fase del progetto, insegnandomi tecnicamente e umanamente. Un ringraziamento speciale per avermi dato la possibilità di far parte del gruppo di lavoro di Architettura Tecnica del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna, partecipando costantemente alle attività didattiche e di ricerca.

Ringrazio il Prof. Brocato per avermi seguito durante il periodo di ricerca svolto presso l'Université Paris-Est, dandomi la possibilità di partecipare ai laboratori e alle sperimentazioni costruttive, fondamentali per lo svolgimento del percorso di tesi secondo un approccio volto tanto alla teoria quanto alla prassi del costruire. Ringrazio tutti i docenti, ricercatori e dottorandi - amici e colleghi - del Laboratoire GSA (ENSA Paris-Malaquais), per avermi accolto fin da subito con grande disponibilità ed entusiasmo.

Inoltre, ringrazio il Nuovo Archivio Tecnico del Settore Lavori Pubblici del Comune di Bologna e l'Archivio Storico di San Giorgio di Piano (Polo Archivistico Regionale dell'Emilia-Romagna) per aver contribuito durante la fase iniziale di ricerca archivistica e raccolta dati sulle scuole secondarie di primo grado bolognesi.

Infine, un particolare ringraziamento a tutti coloro che mi hanno supportato durante questi tre anni, in particolare la mia affettuosa e numerosa famiglia, gli amici sparsi per il mondo ma sempre vicini, i compagni dottorandi con cui ho condiviso speranze e preoccupazioni, gli amici colleghi del Dipartimento di Architettura dell'Università di Bologna e gli amici che mi sono stati sempre vicini.

